

БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»
выпуск 39

В. Б. БРАГИНСКИЙ
А. Г. ПОЛНАРЕВ

УДИВИТЕЛЬНАЯ ГРАВИТАЦИЯ







БИБЛИОТЕЧКА •КВАНТ•
выпуск 39

В. Б. БРАГИНСКИЙ
А. Г. ПОЛНАРЕВ

УДИВИТЕЛЬНАЯ ГРАВИТАЦИЯ

ИЛИ КАК ИЗМЕРЯЮТ КРИВИЗНУ МИРА



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1985

22.313
Б 87
УДК 530.1

Рецензент
доктор физико-математических наук *И. Д. Новиков.*

Брагинский В. Б., Полнарев А. Г.
Б 87 Удивительная гравитация (или как измеряют кривизну мира).— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.— 160 с.—(Библиотечка «Квант». Вып. 39.)—25 к.

В книге рассказывается о гравитационных экспериментах. Особенно подробно описаны эксперименты по проверке общей теории относительности, выполненные за последние 15 лет как на Земле, так и в Космосе. Читатель знакомится и с современными теоретическими представлениями о природе гравитационного взаимодействия, и с новейшими экспериментальными методами исследования гравитационных явлений. Описаны также и те экспериментальные программы, которые еще не завершены, но уже проводятся в целом ряде лабораторий мира, в частности—это программа поисков всплесков гравитационных волн из Космоса, программа обнаружения вихревого гравитационного поля Земли и т. д.
Для школьников старших классов, студентов, преподавателей.

Б $\frac{1704020000-034}{053(02)-85}$ 186-84

ББК 22.313
530.1

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этой книге сделана попытка рассказать школьникам старших классов и всем, кто интересуется физикой, о гравитации.

Гравитационное взаимодействие — самое слабое из всех известных в природе взаимодействий — определяет движение гигантских небесных тел, планет, звезд, галактик и эволюцию самой Вселенной в целом. Но в лабораторных условиях гравитационные эффекты настолько малы, что измерить их — задача не из легких.

Рассказывая о гравитационном взаимодействии, авторы старались следовать изречению выдающегося советского физика, академика И. Е. Тамма: «Студент — это не гусь, которого нужно нафаршировать, а факел, который нужно зажечь». По-видимому, это высказывание относится и к школьникам (тем более, что некоторые из них станут студентами). Поэтому авторы поставили перед собой следующую задачу. Во-первых, познакомить читателя с основными современными представлениями о гравитационном взаимодействии. Во-вторых, дать ему почувствовать, как удивительные особенности гравитации проявляются на опыте.

В книге дается немного истории развития идей и опытов. На примере гравитационных экспериментов читатель увидит, какой трудный и увлекательный путь прошла физика, прежде чем достигла современного уровня понимания основных законов, управляющих миром. В-третьих, авторы поставили еще одну задачу — убедить читателя в том, что нельзя заниматься какой-то одной частью физики, пренебрегая знанием остальных. Физика едина. Это особенно ярко проявляется при осуществлении опытов, когда приходится по необходимости использовать эффекты или методы из различных областей физики. Вот почему в рассказе о гравитационных экспериментах вдруг появляются емкостные датчики, магни-

тометры, лазеры, телескопы, спутники и многое, многое другое.

Авторы надеются, что юные читатели, даже если они не собираются в будущем заниматься гравитационной физикой, расширят свой кругозор и найдут для себя кое-что интересное и полезное в этой бурно развивающейся области физики.

Если авторам удалось заинтересовать читателя, имевшего мужество дочитать эту книгу до конца, они будут считать свою задачу выполненной.

Авторы искренне благодарны Л. Г. Асламазову, И. Д. Новикову и Я. А. Смородинскому за полезные советы и критические замечания по целому ряду вопросов, затронутых в книге. Авторы глубоко признательны О. В. Беляевой и Л. Г. Страут за неоценимую помощь в работе над рукописью.

В. Б. Брагинский
А. Г. Полнарев

§ 1. НЕСКОЛЬКО СЛОВ О ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ВООБЩЕ И О ГРАВИТАЦИОННОМ В ЧАСТНОСТИ

...Я буду цитировать гораздо более достойную вещь — опыт, наставника из наставников.
Леонардо да Винчи

Физику — науку о самых общих, фундаментальных, и в этом смысле самых простых, явлениях неживой природы — считают наиболее развитой среди всех естественных наук. Раньше других наук физика избрала себе в качестве единственного судьи — опыт. И раньше других наук о природе стала наукой количественной: число, численная закономерность играют в физике ключевую роль. Физическая теория давно уже достигла такого уровня, когда все ее предсказания носят количественный характер, а опыт, физический эксперимент — это всегда измерение, процедура получения числа или численной зависимости с помощью тех или иных приборов. И только тогда физическая теория имеет право на жизнь, когда число, предсказываемое теорией, совпадает в пределах точности измерений с соответствующим числом, полученным в эксперименте.

Сразу же следует сказать, что не одна, а несколько теорий, охватывающих один и тот же круг явлений, порою имеют право на жизнь. Может так случиться, что, отличаясь в самой своей основе, теории дают столь близкие количественные предсказания в области явлений, доступных эксперименту, что достигнутой точности измерений не хватает, чтобы сделать выбор, какую из теорий считать правильной.

Но экспериментаторы ставят новые опыты, а теория дает им рекомендации или наводит на мысль, какие эксперименты стоит ставить, а какие мало что добавят к уже известному. По мере того как эксперименты охватывают

все более широкий круг явлений, одни теории оказываются «за бортом», другие выживают.

В этом непрерывном процессе сравнения теории с экспериментом порою случаются «скачки», требующие коренной ломки самых основных представлений в физике. Как правило, это происходит благодаря повышению чувствительности экспериментов, расширению числа и диапазона измеряемых величин. Так или иначе это связано с развитием технологии, с ростом экспериментального потенциала физики. Возьмем в качестве примера ньютоновскую механику. Она с высокой точностью описывает движение небесных тел. Но повышение точности, достигнутое в XX веке, позволило и в движении планет обнаружить отклонения от предсказаний теории Ньютона (например, смещение перигелия Меркурия). Еще раньше эксперименты по электромагнетизму показали, что не все явления охватываются механикой Ньютона, и была построена теория Максвелла, описывающая электрические и магнитные явления. Экспериментальное изучение атомов и элементарных частиц привело к созданию квантовой механики. А описание движения тел со скоростями, не слишком малыми по сравнению со скоростью света, потребовало построения специальной теории относительности.

А. Эйнштейну принадлежит глубокое высказывание о соотношении теории и эксперимента: эксперимент не может подтвердить теорию, он может лишь опровергнуть ее. В это высказывание вложено утверждение о том, что каждую теорию следует рассматривать лишь как приближенную модель. Использованный только что термин «модель» в современной физике отличается от обыденного представления о некоторой конструкции с колесиками и рычажками. «Модель» в физике — это, как правило, некоторая система уравнений, описывающая математически связь между физическими величинами, которые могут быть измерены на опыте. К таким величинам относятся, например, координата, сила, ускорение, заряд и т. д. Правильна или неправильна система уравнений, т. е. физическая модель, можно узнать, поставив опыт и сравнив то или иное конкретное решение этой системы уравнений с результатом опыта.

При создании модели, понимаемой в таком смысле, физики-теоретики, как правило, прибегают к некоторой идеализации — описывая одни соотношения между величинами, объявляют другие несущественными, осознан-

но делают приближения, заранее ограничиваясь той или иной областью значений входящих в уравнения измеряемых величин. В реальном физическом опыте главная задача, которую приходится решать экспериментатору, состоит в том, чтобы устранить, исключить все возможные явления и воздействия, которые «не имеют отношения к делу». Например, если экспериментатору необходимо измерить малый электрический ток, чтобы в конечном счете проверить закон Ома, то, выбрав в качестве измерительного прибора высокочувствительный гальванометр, экспериментатор постарается как можно более тщательно устранить вибрации зеркальца гальванометра, вызванные, например, сейсмическими колебаниями Земли, будет вычитать дрейф «нуля» — изменение положения равновесия нити, связанное с ее деформацией, попытается устранить влияние внешних магнитных полей и т. д., т. е., как говорят экспериментаторы, попытается устранить систематические и случайные помехи, не имеющие отношения в данном случае к закону Ома.

Аккуратное исключение всевозможных внешних и часто внутренних помех сейчас может быть достигнуто лишь при использовании практически всего арсенала накопленного физиками опыта, т. е., по существу, всей физики. К сожалению, в этой трудной работе, которая состоит, как правило, из множества проверок, контрольных испытаний, вычитаний одного эффекта из другого, даже в современной экспериментальной практике случаются ошибки. Так, например, несколько раз в периодической физической печати объявлялось об обнаружении монополя (элементарного магнитного заряда), об обнаружении частиц с дробным по отношению к электрону электрическим зарядом и т. п.

Экспериментальная наука изобилует поистине драматическими ситуациями подобного рода. Однако это еще не «драма» идей, которая приводит к коренной ломке физических представлений, упоминавшейся выше. Из приведенных примеров должно быть ясно, что от физической теории (чтобы ее можно было считать правильной) вовсе не требуется, чтобы ее основные уравнения сразу учитывали все многочисленные взаимосвязи, существующие в реальном мире. Если бы наука пошла по такому пути, то, наверное, прогресс вообще был бы невозможен. Важно другое. Каждая физическая теория имеет свою область применимости, и только в этом смысле ее следует считать приближенной. Другими словами, каждую тео-

рию, т. е. каждую физическую модель, следует рассматривать как предельный случай более общей, быть может еще не построенной, модели. Так, механика Ньютона не требует пересмотра в своей области применимости, но экстраполяция ее выводов за пределы этой области вступает в неизбежное противоречие с опытом.

Начиная наш рассказ о гравитации (другими словами, о тяготении), главным образом о гравитационных экспериментах, необходимо сказать несколько слов о том, какое место гравитационное взаимодействие занимает в современной физической картине мира.

Современной физике известны четыре фундаментальных взаимодействия: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.

Сильное взаимодействие существует между протонами и нейтронами и обеспечивает устойчивость атомных ядер. Благодаря слабому взаимодействию происходит радиоактивное превращение одних ядер в другие с испусканием электронов, позитронов и нейтрино. И первое, и второе взаимодействия являются, как говорят физики, короткодействующими. Это означает, что они быстро убывают с расстоянием. Поэтому эти взаимодействия проявляются только в микромире, и не удивительно, что человек столкнулся с ними, лишь проникнув в глубины микромира. Это произошло совсем недавно, в нашем веке.

Электромагнитное взаимодействие является, в противоположность первым двум, дальнодействующим. Однако в природе существуют электрические заряды двух противоположных знаков, поэтому заряженными являются лишь элементарные частицы, а макроскопические тела, вследствие компенсации зарядов противоположных знаков, являются почти нейтральными: избыток числа положительно заряженных частиц над числом отрицательно заряженных или наоборот в любом макроскопическом теле ничтожно мал по сравнению с общим числом тех и других частиц, иначе тело было бы разорвано электростатическими силами отталкивания. Все, что остается от электромагнитного взаимодействия в макромире,— сравнительно слабые электрические и магнитные поля и электромагнитное излучение, часть которого человеческим глазом воспринимается как свет.

Совсем иначе обстоит дело с гравитационным взаимодействием — как уже говорилось, самым слабым из всех взаимодействий в природе. В микромире гравитационные

силы ничтожны по сравнению с силами электромагнитного, слабого (не говоря уже о сильном) взаимодействия. Так же как электромагнитные, гравитационные силы являются дальнодействующими. Аналогом электрического заряда — гравитационным зарядом — является любая масса или энергия. Но в отличие от электромагнитного взаимодействия, в природе существуют гравитационные заряды только одного знака, между которыми всегда действует гравитационное притяжение и никогда не бывает гравитационного отталкивания. Поэтому самое слабое из всех известных взаимодействий играет главнейшую роль, когда речь идет об объектах космических масштабов: гравитационные силы всегда складываются, а для того чтобы они стали определяющими, массы тяготеющих тел должны быть огромны. Земля — это как раз такое огромное тело; вот почему человек живет в мире, в котором сталкивается с гравитацией каждое мгновение.

И хотя человечество имеет дело с гравитацией постоянно в течение тысяч лет, только в XVII веке благодаря Ньютону люди научились описывать и предсказывать движение тел в гравитационном поле.

Следующим этапом в понимании гравитации явилось создание общей теории относительности (ОТО) Эйнштейном в начале XX века. Такое «запоздалое» проникновение в природу гравитационного взаимодействия имеет свои причины. Дело в том, что поставить активный гравитационный эксперимент, т. е. целенаправленно и существенно изменить гравитационное поле в лаборатории, очень трудно: слишком малые гравитационные заряды (массы) имеются в распоряжении у экспериментатора в земной лаборатории. Вот почему в гравитационных экспериментах пришлось проявлять исключительную изобретательность, чтобы измерять необычайно слабые эффекты на фоне больших негравитационных помех.

Можно сказать, что сегодня главная трудность гравитационного эксперимента не только и не столько в слабости эффектов гравитационного взаимодействия, сколько в относительно высоком уровне помех негравитационного происхождения.

Кроме того, гравитационные эксперименты потребовали расширения «физической лаборатории» до масштабов сначала Солнечной системы, а затем всей Вселенной.

Итак, гравитационные эксперименты занимают в физике особое место, хотя бы потому, что их пока относительно мало по сравнению с числом экспериментов, по-

священных, например, электромагнитному взаимодействию. И причина немногочисленности гравитационных опытов, как мы уже знаем, состоит в конечном счете в том, что гравитационное взаимодействие является самым слабым из всех известных взаимодействий. Поэтому, чтобы поставить новый опыт по проверке гравитационных теорий, в котором была бы достигнута достаточная чувствительность, необходимо затратить весьма значительные усилия, часто привлекать новые методы, разработанные в других областях физики. Иногда на такие опыты уходят многие месяцы и даже годы.

Основная часть этой книги посвящена современным гравитационным экспериментам, и авторы надеются, что читатели почувствуют красоту и изящество многих из этих экспериментов.

§ 2. ЧТО БЫЛО ИЗВЕСТНО О ГРАВИТАЦИИ НЬЮТОНУ

Причину этих свойств силы тяготения я не мог до сих пор вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря.

И. Ньютон

Небольшой исторический экскурс, с которого начинается этот параграф, поможет читателю почувствовать, как непросто давались людям истины, которые в наше время известны каждому школьнику.

Выдающийся философ Древней Греции Аристотель полагал, что скорость падения тел в данной среде пропорциональна весу тела, а увеличение скорости в конце падения он приписывал увеличению веса тела по мере приближения к предопределенному месту. Камень, поднятый над Землей, «чувствует себя», согласно Аристотелю, «противоестественно». Отметим попутно, что по Аристотелю при движении на тело постоянно действует некоторая сила, вызванная взаимодействием тела со средой. Отсюда следовал совершенно неожиданный вывод: пустота невозможна, так как если бы она существовала, то тело мгновенно достигало бы предназначенного ему места (с бесконечной скоростью!). Почти через две тысячи лет после Аристотеля Галилей экспериментально доказывает, что скорость падающего тела в пустоте пропорциональна не высоте падения, как думали его предшественники, а времени падения: $v \propto t$ (хорошо

известный из школьной физики закон увеличения скорости при равноускоренном движении). Говорят, что когда скептически настроенные ученые — современники Галилея — увидели своими глазами, как в стеклянной трубке, из которой выкачан воздух, металлический шарик и пушинка падают совершенно одинаково, то не все из них поверили своим глазам.

Последующие многочисленные эксперименты, начиная с не очень точных экспериментов Галилея и Ньютона и кончая прецизионными (т. е. очень точными) экспериментами, выполненными недавно (см. § 7), со все возрастающей точностью доказывали, что все тела, независимо от их массы, химического состава и других свойств, падают в гравитационном поле (если пренебречь сопротивлением воздуха) с одним и тем же ускорением. Забегая вперед, отметим, что этот экспериментальный факт — универсальность (одинаковость) ускорения свободного падения тел в гравитационном поле — стал краеугольным камнем в основании общей теории относительности Эйнштейна.

Проанализировав огромную совокупность опытных данных, Ньютон понял, что непосредственным откликом тел на приложенную к ним силу является не сама скорость, а ускорение — производная скорости по времени (скорость изменения скорости). Он нашел простую связь между силой $\boldsymbol{F}$ и ускорением $\boldsymbol{a}$, которая очень хорошо оправдывалась на опыте:

$$\boldsymbol{F} = m_{\text{ин}}\boldsymbol{a}. \qquad (2.1)$$

Это всем известный второй закон механики Ньютона. Величина, входящая в виде коэффициента в закон прямой пропорциональной зависимости $\boldsymbol{F}$ от $\boldsymbol{a}$, получила название инертной массы или меры инерции, т. е. меры сопротивления тела силовому воздействию, стремящемуся изменить состояние движения тела (ускорение, замедление, изменение траектории).

Отметим, что этот закон справедлив для силы $\boldsymbol{F}$ любого происхождения. Затем Ньютон обратился к исследованию самих сил $\boldsymbol{F}$: чем определяется величина и направление в том или ином случае. Наиболее значительным его достижением был анализ законов гравитационных сил. Здесь уместно отметить, что до Ньютона существовал огромный опытный (наблюдательный) материал о законах движения планет, полученный в значительной мере знаменитым астрономом Тихо Браге. Его учеником

Иоганном Кеплером (подробнее о законах Кеплера см. § 10) были найдены эмпирические, т. е. полученные из опыта, законы, которые с высокой точностью описывали движения планет. Задача, которую решил Ньютон, заключалась в том, как ввести силу $\boldsymbol{F}_{гр}$ гравитационного происхождения, действующую между Солнцем и планетами, чтобы из уравнения (2.1) следовали опытные законы Кеплера. Ответ, полученный Ньютоном и носящий теперь название закона всемирного тяготения Ньютона, также известен школьникам:

$$|\boldsymbol{F}_{гр}| = G\frac{(m_{гр})_1\cdot(m_{гр})_2}{r_{12}^2}. \qquad (2.2)$$

В этом законе, справедливом в такой форме записи для точечных масс, G — гравитационная постоянная, r_{12} — расстояние между телами. Для Ньютона было ясно, что $(m_{гр})_1$ и $(m_{гр})_2$ — так называемые гравитационные массы тел — по своему физическому смыслу отличаются от инертных масс, которые фигурируют во втором законе Ньютона (2.1). Гравитационная масса в обычных земных условиях определяет вес тела (в невесомости, на орбите это не так). Как убедился сам Ньютон (в результате описанных ниже, в § 7, опытов с маятниками), вес тела всегда пропорционален инертной массе тела. Современникам Ньютона это обстоятельство казалось вполне естественным, тем более, что опыт подтверждал равенство инертной и гравитационной масс. Поэтому Ньютон определил массу так: «Количество материи есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее».

Важно подчеркнуть, что, согласно закону всемирного тяготения, тела не только притягиваются к Земле, но и друг к другу. Вследствие слабости гравитационного взаимодействия притяжение между лабораторными массами, как мы знаем, крайне мало (что соответствует малости постоянной G в (2.2)). Тем не менее Г. Кавендишу удалось с помощью крутильных весов (рис. 1) измерить гравитационную силу между двумя шариками в лаборатории. Смелая догадка Ньютона о том, что все тела, а не только небесные, испытывают взаимное гравитационное притяжение, подтвердилась на опыте. Впоследствии с помощью метода Кавендиша была численно определена постоянная G, входящая в (2.2). Сегодня эта постоянная известна до четвертого знака: $G = (6{,}673 \pm 0{,}003)\cdot 10^{-8}$ см^3/(с$^2\cdot$г). Эксперимент Кавендиша — это

один из немногих «активных» гравитационных экспериментов в истории физики: гравитационное поле создавалось лабораторными массами. Нельзя не отметить огромное значение этого лабораторного эксперимента для астрономии. Зная из наблюдений, как движется Земля вокруг Солнца, можно определить ускорение, а значит, согласно второму закону динамики Ньютона, силу. Затем, зная, что эта сила обратно пропорциональна квад-

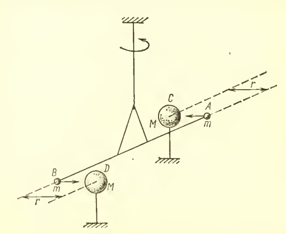


Рис. 1. Упрощенная схема опыта Кавендиша по измерению G. Измерив, насколько закручивается нить, Кавендиш определил силу, действующую между свинцовыми шариками A и C (B и D) массами m и M, убедился, что эта сила обратно пропорциональна квадрату расстояния r, и определил G.

рату известного расстояния до Солнца, можно определить произведение гравитационной постоянной на массу Солнца. Таким образом, зная из опыта Кавендиша гравитационную постоянную, можно «взвесить» Солнце, Землю (изучая движение Луны), Юпитер, Сатурн (изучая движение их спутников) и т. д.

Но не только в астрономии пригодилось знание постоянной G. Возникла целая наука — гравиметрия, которая оказалась очень полезной и для таких вполне земных наук, как, например, геология. О том, что такое гравиметрия и какая от нее польза на Земле и в Космосе, рассказывается в приложении, помещенном в конце этой книги.

Посмотрим теперь на закон всемирного тяготения Ньютона, встав на точку зрения физиков XIX и XX ве-

ков, когда благодаря исследованиям электричества прочно вошли в физику такие понятия, как поле и заряд.

Когда мы говорим о притяжении двух тел, A и B, можно представить себе, что тело A изменяет свойства пространства вокруг себя так, что тело B реагирует на эти изменения пространства, испытывая силу притяжения к телу A, и наоборот. Более лаконично: каждое тело создает вокруг себя гравитационное поле. Снова, воспользовавшись аналогией с электростатикой, можно определить заряд как способность тела реагировать на то или иное поле: например, сила, которую заряженное тело испытывает в заданном электростатическом поле, пропорциональна электрическому заряду этого тела. Мы вправе ввести гравитационный заряд и назвать его, как это исторически и получилось, гравитационной массой $m_{\text{гр}}$. Вы видите, что слово «масса» сюда попало чисто случайно,— можно было бы говорить исключительно о гравитационном заряде, действительно не имеющем ничего общего с инертной массой, о которой шла речь раньше. Гравитационный заряд (или гравитационная масса) говорит о величине силы, действующей на тело в заданном гравитационном поле, тогда как инертная масса говорит нам об ускорении, которое приобретает тело под действием заданной силы, в частности под действием гравитационной силы.

Гравитационное поле, подобно электростатическому, можно описывать с помощью вектора напряженности поля $\boldsymbol{E}_{\text{гр}}$, определив напряженность как силу, действующую на единичный гравитационный заряд. Тогда

$$\boldsymbol{F}_{\text{гр}} = (m_{\text{гр}})_1 (E_{\text{гр}})_2 = (m_{\text{гр}})_2 (E_{\text{гр}})_1. \qquad (2.3)$$

Здесь важно подчеркнуть, что напряженность поля не зависит от тела, которое помещено в поле, а зависит только от того тела, которое это поле создает.

Возникает вопрос: с каким ускорением $\boldsymbol{a}$ движется в заданном гравитационном поле $E_{\text{гр}}$ некоторое тело? Воспользовавшись (2.3) и (2.1), получим

$$a = \frac{m_{\text{гр}}}{m_{\text{ин}}} E_{\text{гр}}. \qquad (2.4)$$

Поскольку факт одинаковости ускорений любых тел в гравитационном поле был установлен на опыте с высокой степенью точности, то из этого следует вывод, что для всех тел отношение $m_{\text{гр}}/m_{\text{ин}}$ является величиной постоянной, не зависящей, как мы уже говорили, от

химического состава тела, от его формы, размера и т. д. При соответствующем выборе системы единиц можно, следовательно, сделать это отношение равным единице. Получилось, что гравитационный заряд (или гравитационная масса) оказался равным инертной массе. Что это — совпадение? Достаточно обратить внимание на то, что в электростатике, в которой центральное место занимает закон Кулона, очень похожий на закон всемирного тяготения, заряд — это заряд, а масса — это масса. И никакой связи между ними нет. Тела имеют совершенно разные отношения $e/m_{\text{ин}}$, а для незаряженных тел и вовсе $e/m_{\text{ин}}=0$. Если $m_{\text{гр}}=m_{\text{ин}}$, то, как видно из (2.4),

$$a_{\text{гр}} \equiv g = E_{\text{гр}}, \qquad (2.5)$$

т. е. раз ускорение всех тел в заданном гравитационном поле одно и то же, то именно оно и является величиной, характеризующей это поле, и при подходящем выборе системы единиц просто совпадает с напряженностью гравитационного поля. Здесь впервые появляется некоторое тождество гравитационного поля и ускорения, отталкиваясь от которого Эйнштейн создал свою общую теорию относительности.

Заканчивая этот параграф, подведем некоторый итог. Ньютон, окончательно преодолев аристотелеву «боязнь пустоты», наделил пустое пространство свойством быть ареной, на которой разгрываются физические явления. Согласно Ньютону все явления, связанные с гравитационным взаимодействием, описываются гравитационными силами, подчиняющимися закону всемирного тяготения и «вложенными» в это пространство. Эти силы действуют на расстоянии (принцип дальнодействия), и причина их возникновения, как следует из эпиграфа к данному параграфу, оставалась нераскрытой.

§ 3. ОТНОСИТЕЛЬНО ЧЕГО ДВИЖУТСЯ ТЕЛА И СВЕТ?

Что касается механической природы лоренцева эфира, то в шутку можно сказать, что Г. А. Лоренц оставил ему лишь одно механическое свойство — неподвижность. К этому можно добавить, что все изменения, которые внесла специальная теория относительности в концепцию эфира, состояли в лишении эфира и этого последнего его механического свойства.

А. Эйнштейн

Путь к пониманию ОТО лежит через СТО (специальную теорию относительности). Забегая вперед, скажем в чем суть ОТО. Согласно ОТО свойства про-

странства-времени определяются материей: материя искривляет пространство-время. В свою очередь, движение материи определяется геометрическими свойствами самого пространства-времени. А гравитационное взаимодействие — это не что иное, как наблюдаемое проявление искривленности пространства-времени.

Представим себе, что материи, искривляющей пространство-время, нет. Каково тогда пространство-время? И почему мы говорим пространство-время, а не пространство и время?

Как мы уже знаем из предыдущего параграфа, Ньютон считал, что «ареной», на которой разыгрываются явления природы, является абсолютное пространство. Но, как понимал еще Галилей, движение относительно: есть смысл говорить лишь о перемещении одного тела относительно другого. Принцип относительности, сформулированный Галилеем, гласит: «Механические явления происходят одинаково в двух системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга». Другими словами, опыт ничего не говорит о существовании абсолютного пространства. Галилей сформулировал также закон инерции (первый закон Ньютона), гласящий: «Тело продолжает двигаться равномерно и прямолинейно, если равнодействующая внешних сил, действующих на это тело, равна нулю». Но это означает, что абсолютное пространство теряет всякий смысл, поскольку нельзя, даже в принципе, измерить движение относительно него. Действительно, пусть с одним и тем же телом происходят два события. Теряет всякий смысл вопрос, произошли ли эти события в одном месте или в разных, поскольку наблюдатель, движущийся вместе с этим телом, ответит утвердительно, а любой другой наблюдатель, движущийся равномерно и прямолинейно относительно первого наблюдателя, конечно же, даст отрицательный ответ. А принцип относительности Галилея в том и состоит, что и первый, и второй наблюдатели совершенно равноправны и заслуживают одинакового доверия.

Поэтому, если исходить из опыта, уже в рамках ньютоновской механики выделенную систему отсчета, неподвижную относительно абсолютного пространства, следует заменить на бесконечное множество инерциальных систем отсчета, т. е. таких систем, в которых справедливы законы ньютоновской динамики. Инерциальные системы отсчета движутся относительно друг друга равно-

мерно и прямолинейно и являются совершенно равноправными.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета I и I'; I' движется относительно I со скоростью $\boldsymbol{v}$ вдоль оси OX (рис. 2). В каждой системе отсчета некоторое событие задается тремя пространственными координатами (x, y, z в I и x', y', z' в I') и моментом времени (t в I и t' в I'). Связь между x, y, z, t и x', y', z', t' дается простыми соотношениями, которые называются преобразованиями Галилея:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \qquad (3.1)$$

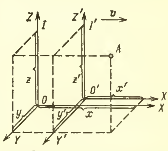


Рис. 2. Две инерциальные системы отсчета I и I', движущиеся относительно друг друга со скоростью $\boldsymbol{v}$, направленной вдоль оси OX. A — некоторое событие, описываемое координатами x, y, z и временем t в I и координатами x', y', z' и временем t' — в I'.

Последнее равенство означает абсолютность времени — время во всех инерциальных системах отсчета течет одинаково. Из (3.1), согласно классической механике, следует, в частности, что скорость некоторого тела относительно I' (обозначим ее через u') связана со скоростью того же тела относительно I (обозначим ее через u) простым соотношением, которое отражает классический закон сложения скоростей:

$$u' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d(x - vt)}{dt} = \frac{dx}{dt} - v = u - v. \qquad (3.2)$$

Если же в уравнении второго закона Ньютона ($F_x = m\ddot{x}$ и т. д.) выразить x, y, z, t через x', y', z', t', воспользовавшись (3.1), то это уравнение сохранит свой вид. В таких случаях говорят, что уравнение инвариантно относительно преобразований Галилея. Инвариантность всех законов Ньютона относительно преобразований (3.1) — это просто другая формулировка классического принципа относительности.

Успехи ньютоновской механики в описании всех известных механических движений, включая движение планет, способствовали тому, что ньютоновские представления о пространстве и времени не подвергались сомнению вплоть до XIX века, когда физика обратилась к изу-

чению совершенно нового класса явлений, на основе которых Фарадей и Максвелл создали электромагнитную теорию. Получив свои знаменитые уравнения, описывающие все электромагнитные явления, Максвелл сделал замечательное открытие: электромагнитное взаимодействие может распространяться в виде волн, скорость распространения которых составляет совершенно определенное значение — 300 000 км/с, т. е. равна скорости света. Но сразу же возник вопрос: это скорость относительно чего? Пытаясь ответить на этот вопрос, попробовали ввести представление о светоносном эфире, т. е. о некоторой гипотетической среде, в которой (и, следовательно, относительно которой) распространяются электромагнитные волны. В известном смысле такая попытка означала возврат к абсолютному пространству: действительно, инерциальная система отсчета, неподвижная относительно эфира, выделена среди прочих инерциальных систем и под «абсолютным движением» можно понимать движение относительно этой системы отсчета.

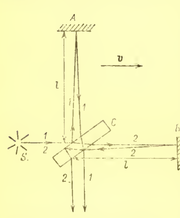


Рис. 3. Схема опыта Майкельсона — Морли: *A*, *B* — зеркала, *C* — полупрозрачное зеркало, *S* — источник, *1*, *2* — интерферирующие лучи, $v = 30$ км/с — скорость Земли относительно Солнца.

В 1887 г. Майкельсон и Морли провели важнейший эксперимент по обнаружению движения Земли относительно «светоносного» эфира (рис. 3). Эксперимент Майкельсона — Морли сыграл очень важную роль в развитии всех последующих представлений о пространстве и времени. Поэтому несколько слов об этом эксперименте. Свет от некоторого источника разделялся с помощью зеркал на два пучка, распространявшихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Затем, отразившись от других зеркал, лучи возвращались обратно и интерферировали друг с другом. Если бы Земля двигалась относительно светоносного эфира, то время t_1, необходимое свету для распространения от полупроз-

рачного зеркала C к зеркалу A (см. рис. 3) и обратно, было бы не равно времени t_2, за которое свет распространяется от зеркала C к зеркалу B и обратно. В этом нетрудно убедиться, заметив, что пока свет «распространяется относительно эфира» со скоростью c, все зеркала тоже «движутся относительно эфира» со скоростью v. Элементарный расчет разности времен $\Delta t = t_1 - t_2$ мы предоставляем читателю. Неодновременность прихода волновых фронтов означает сдвиг интерференционной картины по сравнению со случаем, когда прибор «покоится относительно эфира». Майкельсон и Морли решили в процессе измерения непрерывно вращать свой интерферометр, ожидая, что если Земля действительно движется относительно эфира, то интерференционные полосы должны периодически (из-за вращения интерферометра) смещаться («гулять»). Они достигли великолепной точности, но, увы, никакого «гуляния» интерференционной картины не обнаружили.

Как объяснить такой «отрицательный» результат эксперимента, никто в то время не знал. Правда, оставалась «спасительная» мысль, что именно в тот момент, когда проводился эксперимент, Земля случайно покоилась относительно эфира. Измерения повторили через шесть месяцев, когда Земля двигалась по своей орбите вокруг Солнца в противоположном направлении,— тот же результат. Отрицательный результат эксперимента казался парадоксальным: если Земля неподвижна относительно эфира, то Солнце, Галактика и вся Вселенная движутся относительно эфира, т. е. вращаются вокруг Земли! И это через 300 лет после того, как Джордано Бруно ступил на костер, не желая отречься от учения Коперника, отвергавшего геоцентризм. Пытаясь объяснить результат опыта Майкельсона — Морли, Фицджеральд, а затем и Лоренц выдвинули гипотезу о так называемом сокращении продольных размеров движущихся тел. В рамках этой гипотезы удалось объяснить, почему в эксперименте Майкельсона — Морли не наблюдалось «гуляния» интерференционной картины: расстояния в двух взаимно перпендикулярных направлениях (см. рис. 3) так изменяются в ходе вращения всей установки, что введенная ранее разность времен Δt оказывается в точности равной нулю.

Итак, отрицательный результат опыта Майкельсона — Морли Фицджеральд и Лоренц объяснили, но при этом возникла новая проблема, решить которую пытался

Пуанкаре,— в чем физическая причина изменений продольных размеров движущихся тел? Почему подобного рода «сжатие» вдоль движения возникает во всех инерциальных системах отсчета, кроме одной выделенной, покоящейся относительно мирового эфира?

Совсем иначе подошел к объяснению опыта Майкельсона — Морли Генрих Герц. Он предположил, что эфир увлекается движущимися телами, так что лабораторные эксперименты в принципе не могут обнаружить движение относительно эфира. Но другие физические опыты *) показали, что эта гипотеза неверна.

Как мы теперь знаем, для окончательного разрешения этого парадокса потребовался пересмотр самых фундаментальных представлений о пространстве и времени.

Именно по пути такого пересмотра основ пошел А. Эйнштейн, создатель специальной теории относительности. В отличие от Х. Лоренца, Дж. Фицджеральда, А. Пуанкаре и других, он не ограничивался конкретной целью объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона — Морли. Логика его рассуждений была примерно такова. Принцип относительности, сформулированный Галилеем для механических явлений задолго до открытия электромагнетизма,— рассуждал Эйнштейн,— было бы вполне естественно распространить и на электромагнитные явления.

В своей самой первой работе по СТО Эйнштейн приводит такой простой пример: имеется проводник и магнит, которые движутся относительно друг друга с постоянной скоростью. В системе отсчета, в которой движется магнит, а проводник покоится, согласно законам Максвелла возникает электрическое поле, порождающее в проводнике некоторый ток. В другой системе отсчета, в которой движется проводник, а магнит покоится, никакого электрического поля вокруг магнита нет, но в проводнике возникает электродвижущая сила из-за сил Лоренца, действующих на движущиеся вместе с проводником свободные заряды. В результате в обеих системах отсчета текут совершенно одинаковые токи. Таких примеров можно было бы привести множество. Короче, весь

*) Не вдаваясь в подробности, отметим лишь, что здесь речь идет об эффекте аберрации света и об опыте Физо. Что это такое, интересующиеся могут узнать, например, из книги А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики».— М.: — Наука, 1967.

опыт указывал на то, что принцип относительности справедлив для всех электромагнитных, а не только механических явлений. Но, как мы уже знаем на примере уравнения для второго закона Ньютона, это должно было бы соответствовать инвариантности уравнений Максвелла относительно преобразований Галилея. Но непосредственная проверка показала, что это не так. Применяя преобразования Галилея к переменным, входящим в уравнения Максвелла, физики убедились, что уравнения Максвелла справедливы лишь в одной выделенной инерциальной системе отсчета, в той самой системе, относительно которой скорость распространения электромагнитных волн в точности равна постоянной c (в системе, неподвижной относительно «светоносного эфира»). Лоренц нашел такие преобразования переменных, входящих в уравнения Максвелла, относительно которых уравнения инвариантны. Преобразования эти так и называются «преобразованиями Лоренца», хотя сам Лоренц придавал им лишь формально математический смысл, физический же смысл этих преобразований оставался нераскрытым.

Таким образом, возникла проблема выбора: либо отказаться от сформулированного выше принципа относительности, либо видоизменить теорию Максвелла, вводя какие-то дополнительные гипотезы о свойствах эфира (абсолютного пространства), либо отказаться от справедливости преобразований Галилея. Последнее означало бы отказ от тех привычных представлений о пространстве и времени, из которых с такой очевидностью следовали преобразования Галилея! Эйнштейн первым понял, что, вопреки «здравому смыслу», опыт, беспристрастный судья, вынес приговор именно преобразованиям Галилея, а вовсе не принципу относительности или электромагнитной теории Максвелла. Дело в том, что во всех экспериментах, не связанных с попытками обнаружить абсолютное движение, т. е. движение относительно эфира, уравнения Максвелла «работали» превосходно, т. е. прекрасно объясняли и предсказывали результаты всех экспериментов. Поэтому, подвергнув сомнению преобразования Галилея, Эйнштейн обратился к самим основам — к таким вопросам, как одновременность и связь между пространственными отрезками и временными интервалами в различных инерциальных системах отсчета. При этом на вооружение Эйнштейн принял два постулата, основанных на всей совокупности опытных данных.

Вот эти два постулата, которых оказалось вполне достаточно для построения всего величественного здания СТО:

I. Принцип относительности: все физические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета. Это означает, что говорить об абсолютном движении и об эфире бессмысленно, поскольку не существует эксперимента, с помощью которого можно определить движение наблюдателя относительно эфира.

II. Скорость света одинакова и конечна (а не бесконечна) во всех инерциальных системах отсчета, не зависит от скорости движения источника и является предельной скоростью распространения какого-либо сигнала.

Независимость скорости света от скорости источника противоречит, на первый взгляд, правилу сложения скоростей в ньютоновской механике. Действительно, если источник света движется к наблюдателю со скоростью v и скорость испущенного света относительно источника равна c, то, казалось бы, относительно наблюдателя свет должен двигаться со скоростью $c+v$. Но многочисленные астрономические наблюдения, в том числе наблюдения двойных звезд, совершенно определенно опровергали такой ход рассуждений. Если бы для света был справедлив такой простой закон сложения скоростей, то свет, испущенный одной из звезд в двойной системе, движущейся по направлению к наблюдателю, опережал бы свет, испущенный компонентом, движущимся от наблюдателя (рис. 4). Если учесть это опережение, то видимое взаимное расположение звезд в двойной системе должно заметно отличаться от той картины, которую давали наблюдения. Следовательно, такого опережения нет, и необходимо отказаться от классического закона сложения скоростей. Раз так, то, казалось бы, необходимо ввести понятие эфира как среды, в которой распространяется свет, подобно тому как звук распространяется в воздухе. Тогда скорость распространения света, так же как и скорость распространения звука, действительно не зависела бы от движения источника, а определялась свойствами среды. Но, если бы такая среда существовала, то наблюдатель, движущийся относительно этой среды (эфира), наблюдал бы, опять-таки в соответствии с классическим законом сложения скоростей, изменение скорости света. Но существование эфира, как мы уже знаем, исключалось опытом Майкельсона — Морли.

Следовательно, астрономические наблюдения двойных звезд и результат опыта Майкельсона — Морли вместе

взятые противоречили закону сложения скоростей (3.2). Закон же сложения скоростей, принятый в ньютоновской классической кинематике, является непосредственным следствием абсолютности времени, о чем уже говорилось при обсуждении преобразований Галилея (3.1). Теперь ясно, что путь, избранный Эйнштейном,— анализ самых фундаментальных свойств пространства и времени и в

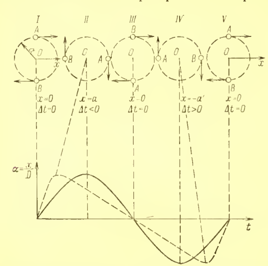


Рис. 4. Проверка независимости скорости света от скорости источника по двойным звездам. Наблюдаемое угловое расстояние α звезды A от неподвижного центра масс O в двойной системе, состоящей из звезд A и B и удаленной от Земли на расстояние D (сплошная кривая — синусоида), соответствует независимости скорости света от скорости источника. Если бы был справедлив классический закон сложения скоростей, то получалась бы штриховая кривая, не согласующаяся с наблюдениями, опережающая ($\Delta t > 0$) или отстающая ($\Delta t < 0$) от синусоиды.

первую очередь анализ понятия одновременности — был продиктован всей совокупностью опытных данных.

Следует отметить, что во времена Эйнштейна, когда были сформулированы постулаты СТО, еще не были известны ни слабые, ни сильные взаимодействия. Основанные лишь на механических и электромагнитных явлениях (экспериментальное подтверждение теории Максвелла, опыт Майкельсона — Морли, независимость скорости распределения света от скорости источника и т. д.) эти постулаты, если смотреть с сегодняшних позиций, являлись довольно смелой гипотезой. (В этом, пожалуй, и со-

стоит качественное отличие любого физического принципа или постулата от тех экспериментальных фактов, на которые данный принцип опирается.) Однако все последующее развитие физики подтверждает СТО; еще ни разу физики не сталкивались с такими опытами, когда бы возникала необходимость отказаться от принципов, лежащих в основе СТО, модифицировать или ограничить область явлений, в которых они применимы.

Что же следует из постулатов СТО? Пожалуй, самым удивительным выводом из этих постулатов является вывод о том, что время «течет» по-разному в разных системах отсчета. Другими словами, в тех преобразованиях, которые пришли на смену преобразованиям Галилея (3.1), т. е. в преобразованиях Лоренца, при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой меняются не только пространственные координаты, но и время. В частности, из этого следует относительность понятия одновременности: два события, одновременные с точки зрения наблюдателя в одной системе отсчета, могут быть не одновременны в другой системе отсчета. А понятие одновременности, если вдуматься, играет важную роль при описании любого механического движения.

Действительно, что это значит — описать движение тела? Это значит задать его координаты в некоторой системе отсчета как функции времени. И тут мы сразу же сталкиваемся с понятием одновременности: утверждение, что в момент времени t тело имеет координаты x, y, z, означает, что одновременно с тем, как тело оказывается в точке с указанными координатами, часы наблюдателя, покоящегося относительно выбранной системы отсчета, показывают время t. Поясним это на простом примере. Действительно, пусть у нас в руках электронные часы. Мы говорим, что к нам пришли гости точно в 18 часов, если одновременно с тем, как раздался звонок, на табло наших часов цифры 17.59 сменились цифрами 18.00. Если в момент, когда раздался звонок, мы находились достаточно близко от двери, то утверждение об одновременности указанных событий не вызывает никаких сомнений. Усложним ситуацию. Пусть на Луну опустился космический аппарат. Что означает утверждение, что это произошло в 18.00 по московскому времени? Можно было бы положиться, например, на часы космонавта, который перед стартом сверил свои часы с часами на Земле. Но где уверенность, что в ходе взлета, полета и прилунения эти часы не отстали и не ушли вперед?

Значит, чтобы говорить об одновременности двух событий в далеких точках пространства, мы должны прежде всего указать какой-то способ сверки часов, или, говоря более научным языком, научиться их синхронизовать. Для этого необходимо использовать какой-то сигнал, скорость которого известна. Электромагнитные волны, в частности свет, лучше всего подходят на роль таких сигналов: их скорость — фундаментальная физическая постоянная, не зависящая ни от свойств источника, ни от свойств приемника.

Итак, несколько слов о синхронизации часов.

Пусть с Земли посылается сигнал на Луну в момент времени $t_З$ по часам, находящимся на Земле рядом с передатчиком. Пусть, далее, в момент времени $t_Л$ по часам на Луне свет достигает зеркала на поверхности Луны и отражается обратно к Земле. И пусть сигнал возвращается на Землю в момент $t'_З$ по земным часам. Часы синхронизованы, если

$$t_Л - t_З = t'_З - t_Л. \tag{3.3}$$

При этом согласно второму постулату Эйнштейна, если L — это расстояние между Землей и Луной, то

$$c = \frac{2L}{t'_З - t_З} \tag{3.4}$$

является фундаментальной постоянной (c=300 000 км/с— скорость света в пустоте). Таким образом, одновременность двух событий (обозначим их как A и B), неподвижных относительно друг друга, но происходящих в различных точках пространства, означает одинаковость показаний синхронизованных часов, одни из которых расположены там, где происходит событие A, а вторые— там, где происходит событие B.

А как же обстоит дело с одновременностью двух событий, одно из которых происходит, скажем, на Земле, а другое — на пролетающем мимо космическом корабле, т. е. в различных инерциальных системах отсчета? Разберемся заодно и с вопросом о том, что такое длина, например, твердого стержня, а именно, как ее можно измерить.

Ничего проще этого вопроса не бывает, скажете вы — и окажетесь правы, но только в том случае, когда стержень покоится относительно той системы отсчета, в которой измеряется его длина. Но допустим, что он движется в направлении оси Ox со скоростью v (т. е. покоится от-

носительно системы I') (рис. 5). Наблюдатель в системе I' определит длину стержня, прикладывая к нему линейку. Пусть эта длина, измеренная таким образом, оказалась равной величине l. Наблюдатель же в системе I должен определить, в каких точках покоящейся системы I находятся концы стержня A и B (см. рис. 5) в некоторый момент времени t. Для этого ему понадобятся не одни, а по крайней мере, пара часов, расположенных в разных местах и синхронизованных с помощью светового

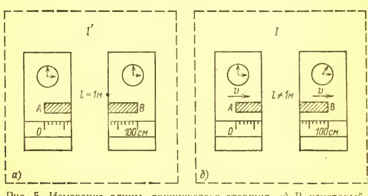


Рис. 5. Измерение длины движущегося стержня. *а*) В некоторый момент времени по часам, синхронизованным в системе отсчета I', относительно которой стержень AB неподвижен, A совпадает с нулевым делением линейки, закрепленной относительно I', а правый конец B совпадает с делением 100 см. *б*) В системе I, относительно которой стержень AB движется с некоторой скоростью v, момент времени, когда A совпадает с нулевым делением линейки, закрепленной относительно I, не равен моменту времени, когда B совпадает с делением 100 см.

сигнала. В классической механике, в которой справедливы преобразования Галилея, молчаливо предполагалось, что результаты этих двух измерений в системах отсчета I и I' одинаковы. Но так ли это на самом деле?

Пусть к каждому из концов стержня прикреплены часы $ч_A$ и $ч_B$. Пусть с точки зрения покоящегося наблюдателя, т. е. относительно системы I, часы $ч_A$ и $ч_B$ показывают одинаковое время, т. е. являются синхронизованными. Это означает, что показания движущихся часов $ч_A$ совпадают с показаниями покоящихся часов, мимо которых часы $ч_A$ пролетают в момент времени t, а показания часов $ч_B$ в свою очередь совпадают с показаниями других покоящихся часов, мимо которых в этот момент пролетают часы $ч_B$, синхронизованных с пер-

выми покоящимися часами. Будут ли в таком случае часы $ч_A$ и $ч_B$ синхронизованы и с точки зрения наблюдателя в системе I', движущейся вместе со стержнем? Если да, то длина движущегося стержня совпадает с длиной стержня покоящегося, если же нет, то вопрос о длине движущегося стержня остается открытым, а мы убеждаемся, что не все так просто, как могло бы показаться на первый взгляд.

Итак, пусть наблюдатель, движущийся вместе со стержнем и находящийся на одном конце стержня A, посылает в момент времени t_A по часам $ч_A$ сигнал в сторону конца B, сигнал в момент t_B по часам $ч_B$ отражается от зеркала, расположенного на конце B, и в момент времени t'_A по часам $ч_A$ достигает наблюдателя. Если мы твердо стоим на справедливости постулата о постоянстве скорости света, то, очевидно, получаем

$$t_B - t_A = \frac{l}{c-v} \quad \text{и} \quad t'_A - t_B = \frac{l}{c+v}. \qquad (3.5)$$

Таким образом, $t_B - t_A \neq t'_A - t_B$, и с точки зрения наблюдателя в системе I' часы $ч_A$ и $ч_B$ не синхронизованы, хотя для наблюдателя в системе I они синхронизованы. Другими словами, мы убедились, что понятие одновременности не является абсолютным, а зависит от выбора системы отсчета, тогда как классическая механика молчаливо предполагала абсолютность понятия одновременности, а тем самым и абсолютность времени вообще. Это было бы справедливо, если бы скорость сигнала, используемого для синхронизации часов, была бесконечной ($c \to \infty$), но таких сигналов в природе не бывает — гласит II постулат СТО.

Таким образом, при использовании преобразований Галилея, предполагающих абсолютность времени и, в частности, одновременности, неявно подразумевали существование в природе бесконечно быстрых сигналов, тогда как теория Максвелла органически включает в себя конечность скорости света, и пересмотр понятия одновременности ей не противоречит. Вот почему Эйнштейн, опираясь на теорию Максвелла и пересматривая классическую механику, неоднократно подчеркивал, что вся теория относительности, по существу, вытекает из теории электромагнитного поля.

В результате глубокого анализа измерения времени и расстояния Эйнштейн получил преобразования координат и времени при переходе от одной инерциальной

системы отсчета к другой. В предельном случае очень малых относительных скоростей ($v/c \ll 1$) полученные Эйнштейном преобразования мало отличаются от преобразований Галилея. Напомним, что эти преобразования были выведены из постулатов о конечности скорости распространения света и принципа относительности, распространенного на все физические явления. Поэтому, как и следовало ожидать, уравнения Максвелла инвариантны относительно этих преобразований, т. е. эти преобразования являются не чем иным, как преобразованиями Лоренца. Другими словами, в результате Эйнштейн вместо преобразований Галилея получил именно такие преобразования координат и времени, относительно которых, как показал Лоренц, не придавая этим преобразованиям никакого физического смысла, инвариантны уравнения Максвелла. СТО придала преобразованиям Лоренца совершенно ясный физический смысл преобразований координат и времени при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. В частности, оказалось, что движущиеся часы всегда идут медленнее, чем покоящиеся.

Но нет ли здесь противоречия с I постулатом СТО, который говорит о полной равноправности наблюдателей в разных инерциальных системах отсчета? Оказывается, с I постулатом здесь все в порядке. Наблюдатель, назовем его A, неподвижный относительно системы отсчета I, считает, что часы, неподвижные относительно системы отсчета I', идут медленнее, чем те, что у него на руке. А наблюдатель A', неподвижный относительно системы отсчета I', по отношению к которому наблюдатель A движется, считает, что часы наблюдателя A идут медленнее. Но разве так бывает? Хотя A и A' совершенно равноправны, может создаться такое ощущение, будто кто-то из них обманывает, но кто — совершенно не ясно. Возникает парадокс. Однако, чтобы выяснить, для кого прошло больше времени, например, кто сильнее постарел — космонавт на ракете или его близнец, оставшийся на Земле, необходимо сравнить показания неподвижных часов, а для этого одну из систем отсчета надо затормозить. Равноправие систем отсчета в этом смысле нарушается: одна из них — инерциальная, а другая была какое-то время ускоренной. (Читателя, который заинтересуется этим вопросом подробнее, мы отсылаем к книге: *Скобельцын Д. В.* Парадокс близнецов в теории относительности.— М.: Наука, 1966.)

Есть еще один кажущийся парадокс. Пусть относительно некоторой инерциальной системы отсчета некоторое тело летит со скоростью $u = {}^3/_4\, c$, а навстречу ему летит другое тело с той же скоростью $v = -{}^3/_4\, c$. Тогда из классического закона сложения скоростей (3.2) следует, что тела сближаются со скоростью ${}^3/_2\, c > c$. Не противоречит ли это второму постулату, согласно которому нет ничего быстрее света? Оказывается нет. В СТО, в которой время уже не является абсолютным, закон сложения скоростей выглядит так:

$$u' = \frac{u - v}{1 - uv/c^2} \qquad (3.6)$$

(ср. с (3.2)). Согласно этому закону два тела, рассмотренных в предыдущем примере, сближаются со скоростью

$$u' = \frac{{}^3/_4\, c + {}^3/_4\, c}{1 + {}^9/_{16}} = {}^{24}/_{25} c < c \ (!)$$

Из закона сложения скоростей (3.6) следует, что никакая сила не сможет сделать скорость тела превышающей c. Это означает, что при стремлении v к c масса тела, т. е. мера инертности, должна стремиться к бесконечности, другими словами, инертная масса тела должна зависеть от его скорости. Действительно, как следует из СТО, масса тела M связана со скоростью v соотношением

$$M = \frac{M_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \qquad (3.7)$$

Здесь M_0 — масса покоя тела, т. е. масса, измеренная в той системе отсчета, относительно которой тело покоится.

А энергия тела (обозначим ее через E) согласно СТО связана с M знаменитой формулой эквивалентности массы и энергии:

$$E = Mc^2. \qquad (3.8)$$

Формула (3.8), по существу, означает, что нет двух независимых величин «масса» и «энергия», как это имело место в классической механике, есть одна величина, называемая массой-энергией. Этот вывод СТО имеет огромное значение для ОТО, о которой речь пойдет в следующем параграфе.

Итак, мы поняли, что время потеряло свой абсолютный, не зависящий от системы отсчета характер. СТО

установила между временем и пространством неразрывную связь, отраженную в преобразованиях Лоренца. Поэтому согласно СТО той ареной, на которой разыгрываются все физические события, является не просто пространство, а четырехмерное пространство-время.

Математик О. Минковский ввел так называемое псевдоевклидово четырехмерное пространство-время, которое теперь так и называется — пространство-время Минковского. Что это за пространство-время? Возьмем обычное трехмерное евклидово пространство, которое лежит в основе нашей стереометрии, изучаемой в школе. Пусть имеются две точки, например концы жесткого стержня. Поместим один из концов в начало декартовой системы координат O. Тогда координаты другого конца A будут x, y, z. Длина стержня l выразится с помощью теоремы Пифагора через x, y, z следующим образом:

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2. \tag{3.9}$$

Теперь перейдем в другую декартову систему координат, повернутую относительно первой так, чтобы их начала совпадали. В новой системе координат конец стержня A будет иметь координаты x', y', z'. Поскольку длина стержня — величина, вообще не зависящая от системы координат, то

$$x^2 + y^2 + z^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2, \tag{3.10}$$

т. е. мы можем сделать вывод, что в трехмерном евклидовом пространстве величина $\sum_{i=1}^{3} x_i^2 \, (x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z)$ при поворотах не меняется. Математики умеют легко работать не только с трехмерными, но и с n-мерными евклидовыми пространствами, в которых длина отрезка будет равна $\sum_{i=1}^{n} x_i^2 \, (i = 1, 2, \ldots, n)$.

Оказывается, согласно преобразованиям Лоренца пространственные координаты x, y, z и время t в одной системе отсчета и соответственно x', y', z' и t' — в другой связаны так, что

$$(ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2 = (ct')^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2. \tag{3.11}$$

Глядя на (3.11), можно по аналогии с (3.10) сказать, что переход от одной инерциальной системы отсчета похож на поворот в некотором четырехмерном пространстве. В качестве длины (или как принято говорить — интер-

вала) в этом пространстве следует считать величину $x_4^2-x_1^2-x_2^2-x_3^2$, где $x_4=ct$. Это четырехмерное пространство называется псевдоевклидовым (из-за знака «—» перед x_1, x_2, x_3) пространством-временем Минковского. Именно оно-то и имеет физическую реальность, является той ареной, на которой происходят все физические явления. При этом еще раз подчеркнем: нет ни абсолютного времени, ни абсолютного трехмерного пространства. Согласно СТО мы живем в псевдоевклидовом пространстве-времени, которое схематически изображено на рис. 6.

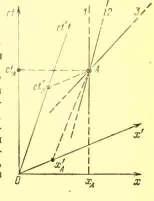


Рис. 6. Пространство-время Минковского. Каждому событию A в системе отсчета I соответствует координата x_A и момент времени t_A (координаты y и z не показаны). В системе отсчета I' этому же событию соответствует координата x'_A и момент времени t'_A, связанные с x_A и t_A преобразованием Лоренца. На рисунке показаны мировые линии: 1 — объекта, неподвижного относительно I, 2 — объекта, движущегося относительно I, 3 — луча света.

Все физические явления соответствуют событиям в этом пространстве-времени. Каждому точечному объекту приписывается так называемая мировая линия, которая является совокупностью событий, происходящих с данным объектом. На рис. 6 приведены примеры мировых линий для объекта покоящегося, движущегося, а также мировая линия луча света. Интервал между двумя событиями не зависит от системы отсчета, хотя пространственные и временные координаты изменяются согласно преобразованиям Лоренца.

Как видно из (3.11), квадрат интервала между двумя событиями может быть как положительным, так и отрицательным,— тогда говорят соответственно о времениподобном и пространственноподобном интервалах. Любые два события на мировой линии светового луча разделены нулевым интервалом, поэтому такую мировую линию принято называть нулевой. Совокупность нулевых мировых линий, соответствующих лучам света, проходящим под всеми возможными направлениями через не-

которое событие O, называется световым конусом. Световой конус делит все пространство-время Минковского на четыре области (см. рис. 7): I — абсолютное будущее — область событий, доступных влиянию со стороны события O, II — абсолютное прошлое — область событий, которые могут влиять на событие O. Обе эти области лежат внутри светового конуса, поэтому квадрат интервала между событием O и любым событием из этих двух областей положителен. Знак интервала, который так же, как и сам интервал, не зависит от выбора системы отсчета, определяет, следовательно, причинные соотношения меж-

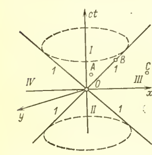


Рис. 7. Пространственно-временная диаграмма (координата z не показана): I — световой конус, I — абсолютное будущее, II — абсолютное прошлое, III, IV — абсолютное удаленное. Интервал между точками O и A — времениподобный, между O и B — нулевой, между O и C — пространственноподобный.

ду событиями. Любое событие из области I может быть следствием события O, но не может быть причиной события O, при этом любое событие из области II может быть причиной события O, но не может быть следствием события O.

Две другие области, III и IV,— это области абсолютного удаления; все события из этих областей вообще никак причинно не связаны с событием O, квадрат интервала, разделяющего любое из этих событий и событие O, отрицателен.

Главный вывод из такого «инвариантного», т. е. не зависящего от выбора системы отсчета, разделения пространства-времени на области I—IV состоит в том, что понятие причинности в СТО имеет абсолютный характер: о двух любых событиях можно однозначно сказать, в каком причинном соотношении друг к другу они находятся. При этом в любой системе отсчета «событие — причина» всегда происходит раньше «события — следствия». А вот какое из двух причинно не связанных событий произошло раньше, а какое позже — зависит от системы отсчета.

Пространственно-временные диаграммы типа той, что изображена на рис. 7, часто используются и при изучении искривленного пространства-времени.

Заканчивая рассказ о СТО, стоит подчеркнуть, что впоследствии СТО получила подтверждение в многочисленных экспериментах, главным образом, в экспериментах, в которых участвуют элементарные частицы. В частности, сегодня без знания СТО не спроектировать и не построить ускоритель элементарных частиц. Не будет преувеличением сказать, что сегодня СТО стала буквально инженерной наукой. Как заметил один физик, «в наш век электричества вращающийся якорь каждого генератора и каждого электромотора неустанно провозглашает справедливость теории относительности — нужно лишь уметь слушать».

§ 4. ЧТО ТАКОЕ ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ОТО)?

Общая теория относительности обязана своим существованием прежде всего опытному факту численного равенства инертной и тяжелой массы тел, причем классическая механика не могла дать никакой интерпретации этому фундаментальному обстоятельству. Такую интерпретацию удалось получить, распространяя принцип относительности на ускоренные относительно друг друга системы отсчета.

А. Эйнштейн
(Собрание научных трудов, т. II, с. 110)

В предыдущем параграфе мы познакомились со специальной теорией относительности (СТО). Главный вывод СТО заключается в том, что арена, на которой разворачиваются физические явления,— это четырехмерное пространство-время. Однако, рассказывая о СТО, мы сознательно не затрагивали вопроса о возможном влиянии самой материи на свойства этой арены. Действительно, в пустоте, вдали от массивных тел четырехмерное пространство-время является псевдоевклидовым четырехмерным пространством-временем Минковского. Возникает естественный вопрос, каковы же свойства пространства-времени, например, вблизи массивных тел. Вопрос можно поставить точнее: каковы геометрические свойства реального пространства-времени, как они зависят от свойств материи? Поэтому прежде чем переходить к описанию ОТО, которая отвечает на этот вопрос, несколько слов о геометрии.

Школьная программа по геометрии устроена так, что постулаты, леммы и теоремы евклидовой геометрии глу-

боко проникают в сознание человека и ему потом очень непросто представить себе, что евклидова геометрия с математической точки зрения — это лишь одна из возможных геометрий, причем самая простейшая. Например, среди постулатов евклидовой геометрии есть такой: через данную точку можно провести только одну прямую, параллельную некоторой заданной. В начале прошлого века многим геометрам казалось, что это вовсе не постулат, а теорема, вытекающая из других постулатов. Выдающийся русский ученый Н. И. Лобачевский доказал, что это все-таки постулат: он построил непротиворечивую геометрию, ничем с логической точки зрения не хуже евклидовой, но в которой указанный постулат отсутствует. Как впоследствии было понято, речь шла о геометрии на гиперболоиде вращения, тогда как евклидова геометрия в случае двух измерений есть геометрия на плоскости. Независимо от Лобачевского, но несколько позже, к аналогичной геометрии пришел венгерский математик Больяи. Затем Б. Риман построил целый класс геометрий, которые в двумерном случае соответствовали геометриям на произвольных замкнутых поверхностях, например на поверхности эллипсоида вращения. И Лобачевский, и Риман сразу же поняли, что их открытие иных геометрий влечет за собой важный, уже не геометрический, а физический вопрос: а какова все-таки геометрия окружающего нас мира? Ибо теперь уже нет логических оснований считать, что она обязательно евклидова. Следовательно, ответить на этот вопрос можно только опытным путем. Кто-то из великих сказал примерно так: «Величие человеческого разума в том и состоит, что человек может понять существенно больше, чем в силах себе представить». Действительно, мы без труда представляем себе любое искривленное двумерное пространство: поверхность шара, сложную поверхность какой-нибудь вазы, автомобильного крыла и т. д. Но уже трехмерное пространство мы можем представить себе только плоским, т. е. евклидовым. А пространство еще большей размерности мы вообще наглядно представить себе не можем. Но с помощью математики мы можем понять геометрию пространств любой размерности. Чтобы ясно представить себе, в чем отличие искривленного пространства от евклидова, рассмотрим сначала двумерный случай.

Представим себе, что на большой сфере живут разумные двумерные существа, всю жизнь передвигающиеся

по сфере и неспособные в принципе покинуть ее. Пусть одно из таких существ, выбрав некоторую точку на поверхности сферы в качестве исходной, отползает по дуге большого круга на некоторое расстояние и затем ползет по некоторой окружности на сфере, не приближаясь и не удаляясь от исходной точки. Существо может измерить теперь длину этой окружности. Поделив эту длину на «диаметр» окружности, измеренный вдоль дуги большого круга, существо может проверить важнейший геометрический факт, присущий евклидовой геометрии. Если окажется, что это отношение равно числу π, то существо вправе сделать вывод, что живет на плоскости; если же это отношение не будет равно числу π, то это поставит нашего двумерного коллегу в тупик, если он не догадается, что живет на искривленной сферической поверхности. Чем меньше радиус окружности, или больше радиус сферы, тем труднее заметить отличие поверхности сферы от касательной к ней плоскости (рис. 8).



Рис. 8. Чем больше радиус сферы, тем меньше ее локальные отличия от касательной плоскости.

Нечто похожее может случиться и с трехмерными разумными существами, живущими в реальном трехмерном пространстве, т. е. с нами. Проводя измерения в малых областях пространства вдали от массивных тел, мы можем и не заметить отличия нашего трехмерного пространства от евклидова, а четырехмерного пространства-времени от псевдоевклидова пространства-времени Минковского. Но если описать окружность вблизи массивного тела, то не окажется ли, что отношение ее длины к диаметру будет не равно π?

Согласно ОТО, вобравшей в себя представления СТО о едином пространстве-времени, а не о времени и пространстве в отдельности, гравитационное поле, создаваемое массивными телами, это, по сути, и есть проявление искривленности пространства-времени. ОТО устанавливает количественную взаимосвязь между геометрическими свойствами пространства-времени и поведением материи в этом пространстве-времени. Другими словами, согласно ОТО, свойства той арены, на которой разворачи-

ваются все физические события, т. е. пространства-времени, взаимосвязаны с характером того, что на этой арене происходит, т. е. с физическим поведением материи.

Чтобы в самых общих чертах представить себе, что такое ОТО, выделим два основных вопроса, на которые должна уметь отвечать любая теория гравитации, в том числе и ОТО.

Первый вопрос. Предположим, что гравитационное поле задано. Как в этом поле движутся тела, свет, вообще материя, если обратным влиянием рассматриваемых объектов на само гравитационное поле можно пренебречь? Такие объекты принято называть пробными. Например, спутник — это пробное тело в гравитационном поле Земли, а саму Землю можно считать пробным телом в гравитационном поле Солнца.

Второй вопрос. Пусть задано распределение материи в пространстве и известно, как материя движется. Какое гравитационное поле создает такая материя? Например, какое гравитационное поле создает вокруг себя звезда или планета?

Научившись отвечать на оба эти вопроса, теория позволяет в принципе решить, как говорят физики, самосогласованную задачу: материя создает гравитационное поле, которое, в свою очередь, влияет на движение самой материи.

Итак, попытаемся сначала научиться отвечать на первый вопрос.

Вернемся к принципу относительности, положенному в основу СТО. Как мы уже знаем, этот принцип гласит, что все законы физики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета. Можно ли обобщить этот принцип на произвольные системы отсчета, движущиеся с ускорением относительно инерциальных? Казалось бы, нет. Ведь неинерциальные системы отсчета принципиально отличаются от инерциальных: в неинерциальной системе отсчета тело движется с ускорением, даже если на него не действуют силы со стороны других реальных объектов. Но всегда ли можно отличить подобного рода «фиктивные» ускорения от тех ускорений, которые вызваны физическим взаимодействием тел?

Отличительная особенность «фиктивных» ускорений, связанных с переходом в неинерциальную систему отсчета,— та, что все тела, на которые не действуют силы, испытывают одинаковые ускорения. Но все тела испытывают одинаковые ускорения и в случае однородного,

т. е. постоянного по пространству, гравитационного поля. Обратимся к такому примеру. Представим себе космическую ракету, пролетающую так далеко от гравитирующих тел — звезд или планет, что гравитационные силы, действующие на ракету, ничтожно малы. Пусть мощность ракетных двигателей подобрана так, чтобы ускорение, с которым движется ракета, в точности равнялось ускорению свободного падения $\boldsymbol{g}$. На космонавта, который сидит в ракете, действует единственная сила — реакция опоры со стороны кресла $\boldsymbol{N}$. Именно эта сила сообщает космонавту ускорение: согласно второму закону Ньютона $\boldsymbol{N}=m_{\text{ин}}\boldsymbol{g}$, где $m_{\text{ин}}$ — инертная масса космонавта. Космонавт помнит, что перед стартом, когда ракета стояла неподвижно на Земле, на него со стороны кресла действовала сила $\boldsymbol{N}'$, уравновешивающая силу притяжения к Земле, т. е. $\boldsymbol{N}'=m_{\text{гр}}\boldsymbol{g}$. И в том, и в другом случае у космонавта создавалось ощущение, что какая-то сила вдавливает его в кресло. Если $m_{\text{ин}}=m_{\text{гр}}$, то $\boldsymbol{N}=\boldsymbol{N}'$. Значит, если гравитационная и инертная массы совпадают, в том и другом случае космонавт должен испытывать совершенно одинаковые ощущения: т. е. он, закрыв наглухо иллюминаторы, не смог бы угадать — неподвижна ли ракета, но вблизи есть тело, создающее гравитационное поле с напряженностью $\boldsymbol{g}$ (см. § 2), или гравитационное поле отсутствует, но ракета движется с ускорением $\boldsymbol{g}$.

Рассмотренный пример иллюстрирует идею, положенную в основу ОТО: никакой локальный эксперимент, т. е. эксперимент, проводимый в малой части пространства, в изолированной лаборатории, не позволяет отличить гравитационное поле от ускорения. Действительно, если эксперимент проводится в достаточно малой области пространства, то в этой области гравитационное поле можно с высокой точностью считать однородным. Конечно, в случае нелокального эксперимента можно заметить, что в разных точках пространства ускорения различны (например, чем дальше от Земли, тем меньше ускорение свободного падения). Поэтому гравитационное поле в протяженной области не эквивалентно переходу в неинерциальную систему отсчета. Другими словами, следует все время помнить, что эквивалентность гравитационного поля и ускорения справедлива лишь локально. Это означает, что с учетом гравитационного поля все без исключения системы отсчета (в том числе и неинерциальные) совершенно равноправны при описании локальных физических явлений. В этом и со-

стоит главный принцип ОТО — принцип эквивалентности, в основе которого лежит равенство инертной и гравитационной масс, знакомое каждому школьнику.

В классической механике равенство инертной и гравитационной масс — это всего лишь случайное совпадение. В ОТО — это фундаментальный принцип, обобщающий результаты многочисленных опытов и отражающий природу гравитационного взаимодействия.

Принцип эквивалентности означает, что не только скорости равномерного прямолинейного движения являются относительными, но и ускорения. Все уравнения ОТО, которые слишком сложны, чтобы их здесь выписывать, обладают одним замечательным свойством: они выглядят одинаково не только во всех инерциальных системах отсчета, но вообще во всех системах отсчета. Другими словами, уравнения ОТО инвариантны относительно произвольных преобразований координат и времени (ср. с инвариантностью относительно преобразований Галилея и Лоренца, § 3).

А теперь попытаемся понять, каким образом, зная СТО и опираясь на принцип эквивалентности, можно описать влияние гравитационного поля на физические процессы. Начнем с самого простого случая однородного гравитационного поля.

Пусть имеется неинерциальная система отсчета I', движущаяся в данный момент относительно инерциальной системы отсчета I. Зная ускорение I' относительно I, мы в каждый момент времени можем определить скорость движения I' относительно I. А зная скорость, мы с помощью преобразований Лоренца, о которых шла речь в § 3, можем связать координаты и время любого события в системе I с координатами и временем этого же события в системе I'. Оказывается, что, зная преобразования Лоренца, можно установить связь не только между координатами и временем в разных системах отсчета, но и между любыми другими величинами, например силами. Другими словами, если мы умеем описывать физические явления в I, то с помощью СТО можем дать их описание и в системе I'. Но ускорение системы I' относительно I эквивалентно, как мы в том убедились, существованию в I' гравитационного поля. Следовательно, можно рассчитать влияние гравитационного поля на ход рассматриваемых физических процессов, например, ответить на вопрос: как влияет гравитационное поле на распространение луча света? В классической теории Ньютона этот

вопрос сталкивается с такой бездной неопределенностей, что самое разумное было бы сказать, что никак не влияет. Отталкиваясь же от принципа эквивалентности, мы с легкостью даем ответ: поскольку относительно инерциальной системы отсчета свет распространяется прямолинейно, то относительно ускоренной системы отсчета его траектория описывается некоторой кривой линией (рис. 9); следовательно, говорим мы, и в гравитационном поле свет распространяется по кривой.

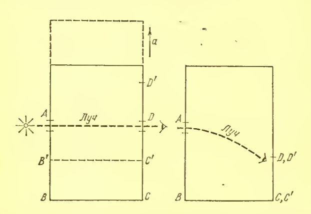


Рис. 9. Отклонение луча света в ускоренной системе отсчета.

Теперь попробуем описать физические явления в неоднородном гравитационном поле. Для этого необходимо пространство, в котором имеется гравитационное поле, разбить на маленькие ячейки так, чтобы размер ячейки был намного меньше того характерного размера, на котором заметны пространственные изменения гравитационного поля. Например, при изучении гравитационного поля Земли размер такой ячейки должен быть намного меньше радиуса Земли, и чем размер ячейки меньше, тем более высокой точности описания мы добьемся. Тогда, с точностью, определяемой размером выбранной ячейки, мы можем считать поле внутри ячейки однородным. Если гравитационное поле по какой-то причине является переменным по времени (например, если речь идет о гравитационном поле быстро пролетающей кометы), то не будем требовать от нашего разбиения на ячейки слишком многого — проследим влияние гравитационного поля на изучаемые явления в течение достаточно малого времени,

которое намного меньше, чем то время, за которое поле существенно изменится. Иными словами, речь идет, если вы заметили, о разбиении пространства-времени на четырехмерные ячейки, внутри каждой из которых гравитационное поле можно считать однородным и постоянным. Но однородное и постоянное гравитационное поле, как мы уже знаем, полностью эквивалентно переходу в ускоренную систему отсчета, который с успехом проводится с помощью СТО. Следовательно, мы умеем ответить на вопрос о влиянии гравитационного поля на любое событие, локализованное, если так можно выразиться, и во времени, и в пространстве. После этого необходимо лишь сопоставить, свести воедино всю информацию, полученную для каждого события в отдельности, и тогда мы сможем ответить на вопрос о влиянии гравитационного поля на явления, протяженные и во времени, и в пространстве.

Как лучше провести такое сопоставление или, как говорят физики, каким для этого воспользоваться аппаратом? Создатель ОТО понял, что такой аппарат уже разработан математиками — это геометрия искривленных пространств, построенная Лобачевским, Риманом, Гауссом и другими. Этот математический аппарат, грубо говоря, сводится к использованию вместо декартовых координат некоторых, так называемых криволинейных координат, которые иначе еще называют гауссовскими координатами. Поясним суть вышесказанного на двумерной аналогии. Рассмотрим сначала плоский лист тетради в клеточку. На плоскости листа можно ввести декартовы координаты так, что каждой точке A соответствуют два числа x_1 и x_2, указывающие, как попасть из начала координат O в точку A: надо пройти по горизонтали x_1 см, а затем по вертикали — x_2 см. Для соседних точек координаты x_1 и x_2 отличаются незначительно. Если точка B имеет координаты x_1+dx_1 и x_2+dx_2, то ее расстояние до точки A связано с dx_1 и dx_2 соотношением

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2. \qquad (4.1)$$

Такая зависимость квадрата расстояния между соседними точками, сводящаяся к сумме квадратов приращений координат, означает, что мы имеем дело с евклидовым пространством.

Введем теперь на том же плоском листе бумаги координаты совершенно иного рода. Начертим вместо прямых, образующих прямоугольные клеточки, два семей-

ства таких кривых, что кривые одного семейства друг с другом не пересекаются (рис. 10). Каждой кривой одного семейства припишем число u_1, а каждой кривой другого семейства — число u_2. Числа u_1 и u_2 могут быть использованы в качестве координат ничуть не хуже чисел x_1 и x_2. Так же как и раньше, каждой точке A соответствует пара чисел u_1 и u_2, указывающая, на пересечении каких кривых находятся эти точки. Соседней точке B соответствует пара близких чисел u_1+du_1 и u_2+du_2. Но теперь квадрат расстояния между точками A и B не равен сумме квадратов du_1 и du_2. Закон, по которому определяется расстояние между двумя соседними точками, если известны разности их координат, связан с выбором криволинейных координат.

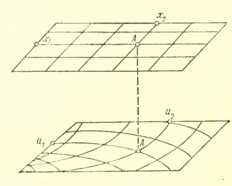


Рис. 10. Криволинейные координаты.

Если речь идет об определении положения точки на плоской поверхности, то мы всегда можем пересчитать по заданным u_1 и u_2 декартовы координаты x_1 и x_2, т. е. осуществить преобразование координат

$$x_1 = x_1(u_1, u_2),$$
$$x_2 = x_2(u_1, u_2), \tag{4.2}$$

в результате которого квадрат расстояния между двумя соседними точками примет вид (4.1).

Но, если мы имеем дело с кривой поверхностью, например с поверхностью автомобильного крыла, то декартовы координаты вообще нельзя ввести, т. е. ни при каком выборе координат квадрат расстояния между двумя точками не равен сумме квадратов приращений координат. Тогда мы говорим, что пространство не является

евклидовым. Гаусс и Риман подробно разработали теорию, позволяющую определять геометрические соотношения на таких поверхностях. Эта теория сейчас называется римановой геометрией. Как мы уже отмечали, математики, научившись что-то делать с двумерными пространствами, способны обобщить достигнутое на случай любого числа измерений. Элемент длины или, согласно принятой терминологии, элемент интервала между соседними точками или, лучше сказать, событиями в четырехмерном пространстве-времени Минковского (см.(3.11)) определяется как

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2. \qquad (4.3)$$

В полной аналогии со случаем двумерной поверхности можно ввести вместо x, y, z и t произвольные криволинейные координаты u, v, p и τ, для которых выражение типа (4.3) будет уже несправедливо.

Пространство-время в общей теории относительности не является псевдоевклидовым, потому что не существует такой единой инерциальной системы отсчета, которая покрывала бы все пространство-время. В каждом событии пространства-времени можно выбрать локально инерциальную систему отсчета, продолжив которую неограниченно во времени и в пространстве, мы получим касательное плоское пространство-время; но при переходе к другому событию локально инерциальная система отсчета будет немного отличаться от предыдущей, т. е. как бы «повернута», подобно тому как касательные плоскости к двумерной искривленной поверхности повернуты относительно друг друга. Таким образом, принцип эквивалентности ускорения и локального гравитационного поля, в основе которого лежит равенство инертной и тяжелой масс, неизбежно приводит к представлениям об искривленном четырехмерном пространстве-времени, в котором темп течения времени различен в различных точках и в котором невозможно ввести единую инерциальную систему отсчета во всем пространстве.

Но отсутствие жестких инерциальных систем отсчета ничуть не мешает вполне четкому описанию явлений. Если мы вводим произвольные криволинейные гауссовы координаты, то можем констатировать совпадение двух событий, можем рассчитывать расстояния и интервалы времени между событиями, т. е. полностью описывать геометрические свойства пространства-времени. А свойства пространства-времени определяют поведение мате-

рии в нем: движение тел и лучей света, деформации и т. д.

Теперь основная идея принципа эквивалентности может быть сформулирована без привлечения систем отсчета, жестко связанных с некоторыми телами. Как пишет Эйнштейн: «Все гауссовы системы координат в принципе эквивалентны для формулирования общих законов природы». Итак, если имеется некоторое гравитационное поле, то все частицы и лучи света, которые при отсутствии гравитационного поля двигались бы по прямым линиям, теперь должны двигаться по кратчайшим путям — как и прежде. Но когда пространство-время искривлено, кратчайший путь будет не прямым, а кривым. Такие кривые линии называются геодезическими. Их можно всегда рассчитать, если известно гравитационное поле.

Поэтому по движению частиц и лучей света, т. е. зная их мировые линии (траектории в пространстве-времени), можно восстановить все свойства гравитационного поля.

Итак, с первым важнейшим вопросом, встающим перед теорией гравитации,— как поле влияет на поведение материи — мы в общих чертах разобрались. Мы обсудим целый ряд явлений, связанных с движением пробных тел и лучей света в гравитационном поле, по отдельности и более подробно в последующих разделах этой книги.

Но есть и второй, не менее важный вопрос: чем определяется само гравитационное поле, т. е. от чего зависит геометрия пространства-времени? В классической теории гравитационное поле определялось только распределением массы. Действительно, если из закона всемирного тяготения Ньютона в любой наперед заданной точке пространства мы знаем гравитационное поле, создаваемое точечным телом, то, разбивая любое распределение массы на множество точечных масс, складывая их гравитационные поля, мы сможем определить гравитационное поле, создаваемое произвольным распределением масс.

Когда же речь идет о построении теории гравитации, которая ставит своей целью учесть конечность скорости распространения любых сигналов, можно предвидеть, что гравитационное поле будет зависеть не только от распределения масс, но и от скоростей или импульсов, с которыми движутся элементы материи: изменение положения отдельных элементов вещества должно сказываться на гравитационном поле.

Поскольку мы знаем из специальной теории относительности, что масса и энергия — одно и то же, то гравитационное поле должно определяться некоторой комбинацией энергии и импульсов. Мы здесь не будем вникать в особые тонкости, но все-таки, учитывая принципиальную важность закона, согласно которому создается (генерируется) гравитационное поле, скажем следующее. Довольно сложные уравнения ОТО позволяют рассчитать величины, которые называются потенциалами гравитационного поля. Эти величины определяют геометрические свойства пространства-времени. В предельном случае, когда скорости тел, создающих гравитационное поле, малы, а само гравитационное поле является слабым, т. е. пространство-время почти не искривлено, все гравитационные потенциалы сводятся к одной величине — обычному ньютоновскому гравитационному потенциалу. Напомним, что гравитационный потенциал в теории Ньютона — это потенциальная энергия тела единичной массы, помещенного в гравитационное поле.

На этом мы заканчиваем наше описание структуры ОТО. Переходим к конкретным физическим следствиям общей теории относительности.

§ 5. ЧТО МОЖЕТ ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ ПОСОВЕТОВАТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАТОРАМ

Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые; иначе такое бросание будет пустой забавою.

Из сочинений Козьмы Пруткова
(Афоризм № 156)

В предыдущем параграфе было дано качественное описание ОТО. В этом параграфе мы обсудим те рекомендации, которые ОТО дает экспериментаторам и наблюдателям. Мы постараемся представить себе, какими должны быть эксперименты или наблюдения, в которых ставится задача — либо проверить принципы, лежащие в основе ОТО, либо сопоставить конкретные количественные предсказания этой теории с опытом.

Прежде всего, как и всякая другая физическая теория, ОТО требует проверки тех принципов (постулатов), которые лежат в ее основе.

Один из принципов — справедливость СТО в достаточно малых областях пространства-времени — подтвержден многочисленными лабораторными экспериментами, не имеющими непосредственного отношения к гравитации (см. § 3).

Второй принцип, на который опирается ОТО,— принцип эквивалентности — имеет самое непосредственное отношение к гравитации (см. § 4). Начиная с Галилея и Ньютона неоднократно ставились эксперименты, с возрастающей точностью доказывающие независимость ускорения свободного падения от конкретных свойств пробных тел. Такое свойство падения пробных тел — непосредственное экспериментальное подтверждение принципа эквивалентности. Рекомендация ОТО очевидна: этот принцип необходимо проверять с той точностью, которую позволяет современный уровень экспериментальной техники. А это, в свою очередь, означает, что с ростом «культуры» измерений (с повышением чувствительности и разрешения приборов) необходимо возвращаться к опытам по проверке принципа эквивалентности. В последние годы были выполнены опыты как в земных лабораториях, так и опыты в масштабе Солнечной системы, где в качестве пробных тел использовались Земля и Луна. Этому кругу вопросов посвящен § 7.

ОТО связывает гравитацию с искривлением пространства-времени. Это означает, во-первых, что в гравитационном поле вблизи массивного тела время течет иначе, чем вдали от него, где гравитационное поле слабее. Отсюда следует рекомендация для экспериментаторов: сравнить ход одинаковых часов, удаленных на различные расстояния от Земли или от Солнца; другая («родственная» этой) рекомендация: измерить изменение частоты фотонов, удаляющихся или приближающихся к Земле или к Солнцу. Описанию этих экспериментов посвящен § 8.

Искривление пространства-времени в гравитационном поле означает, во-вторых, что трехмерное пространство перестает быть евклидовым. Это должно проявиться в определенном искривлении фронта электромагнитных волн гравитирующими телами. Отсюда следует еще одна рекомендация экспериментаторам: необходимо проследить, как распространяются лучи света и радиоволны в гравитационном поле Солнца, измерить отклонения таких лучей и сопоставить обнаруженную таким образом неевклидовость с численным предсказанием ОТО. При таких измерениях (см. § 9), конечно, будет сказываться и изменение темпа течения времени в гравитационном поле.

Но не только на распространение электромагнитных волн влияет искривление пространства-времени. Движе-

ние пробных тел, таких, как планеты или спутники, согласно ОТО происходит по геодезическим в искривленном пространстве-времени. При этом даже в слабом гравитационном поле Солнца траектории пробных тел немного отличаются от тех траекторий, которые предсказываются теорией Ньютона. Чем ближе к Солнцу, тем сильнее эти отличия. Поэтому ОТО рекомендует внимательно изучать движение ближайшей к Солнцу планеты Меркурий и попытаться обнаружить указанные отличия ее траектории от траектории, предсказываемой законами Ньютона. Кроме того, ОТО рекомендует обратиться к изучению движения объектов в далеком космосе. Если найдутся такие объекты, которые движутся в сильном гравитационном поле, а параметры их орбит известны с достаточной точностью, то такие объекты могут быть использованы в качестве лаборатории по проверке ОТО вне Солнечной системы. Этому кругу вопросов посвящен § 10.

Все рекомендации ОТО, перечисленные выше, относились к экспериментам в неизменном во времени статическом гравитационном поле, создаваемом неподвижными телами. Движение гравитирующих тел согласно ОТО должно влиять на создаваемое ими гравитационное поле. Действительно, ОТО с самого начала строилась как релятивистское обобщение теории Ньютона, с тем чтобы совместить теорию гравитации с конечной скоростью распространения любых сигналов. Можно провести такую аналогию: закон всемирного тяготения, очень похожий на закон Кулона,— это закон гравистатики (сравните с электростатикой), а уравнения ОТО — это уравнения гравидинамики (сравните с электродинамикой).

В частности, ОТО предсказывает, что вращающееся гравитирующее тело наряду со статическим (потенциальным) полем будет создавать вокруг себя стационарное гравитационное поле вихревого характера, очень похожее на стационарное магнитное поле вращающегося заряженного тела. Как обнаружить такое вихревое гравитационное поле? Ответ следует из того обстоятельства, что вихревое гравитационное поле (назовем его по аналогии с электродинамикой гравимагнитным) действует на движущиеся пробные массы, а на покоящиеся пробные массы не действует (движение определяется относительно центра гравитирующего тела). ОТО дает, следовательно, такую рекомендацию: чтобы измерить связанное с вращением Земли гравимагнитное поле, надо вывести

на орбиту вокруг Земли вращающееся тело (гироскоп) и проследить, как оно будет себя вести. Как экспериментаторы следуют этой рекомендации и что уже в этом направлении сделано, рассказывает § 11.

Продолжая аналогию с электродинамикой, триумфом которой явилось предсказание и открытие электромагнитных волн, мы можем ожидать, что нечто похожее должно произойти и в гравидинамике. Конечность распространения гравитационного взаимодействия привела Эйнштейна на самой заре развития ОТО к предсказанию существования гравитационных волн. Эти волны еще не открыты, но их поиски в настоящее время интенсивно ведутся в целом ряде лабораторий мира. Подобно тому, как электромагнитные волны, регистрируемые радио- и оптическими телескопами, несут нам информацию о движении заряженных частиц в космическом пространстве, гравитационные волны должны нести информацию о грандиозных движениях космических масс. Гравитационные волны — это слабые всплески волн кривизны, докатившиеся до детектора в Солнечной системе. Ученые надеются, что, обнаружив эти всплески, они получат очень важную информацию о далеких катастрофах во Вселенной. Рассказ о гравитационных волнах и способах их обнаружения пойдет в § 12.

Все вышесказанное относилось к экспериментам в слабых гравитационных полях. Правда, гравитационные волны слабы вблизи детектора, а там, где они возникают (генерируются), гравитационные поля могут быть очень сильными.

По мнению советского астрофизика В. Л. Гинзбурга подлинно актуальной является проверка ОТО в сильном гравитационном поле. Но, к сожалению, создать достаточно сильное гравитационное поле в лаборатории (включающей всю Солнечную систему), по крайней мере в ближайшее столетие, не удастся. Поэтому в поисках проявлений ОТО в сильных гравитационных полях мы должны выйти за рамки Солнечной системы. Другими словами, от экспериментов мы должны обратиться к астрономическим наблюдениям. Находясь в состоянии пассивных наблюдателей, мы не можем исключить множество астрофизических явлений, не имеющих непосредственного отношения к гравитации. В каждом астрономическом объекте теснейшим образом переплетаются и гидродинамические процессы, и процессы переноса излучения, и плазменные неустойчивости, и т. д., и т. п. И хотя

гравитация играет определяющую роль в жизни астрономических объектов, измерить с нужной точностью те величины, которые необходимо сопоставлять с предсказаниями ОТО, как правило, крайне трудно. Но, тем не менее, предсказание ОТО — существование черных дыр, объектов со сверхсильным гравитационным полем — находится в центре внимания многих астрономов и астрофизиков (не только теоретиков, но и наблюдателей). Об актуальной проблеме современной релятивистской астрофизики — о поисках черных дыр — будет рассказано в § 13.

Другой объект, в котором ОТО должна проявляться в полной мере,— это Вселенная в целом. Чем более массивен и более протяжен объект, тем большую роль играет в нем гравитация. Вселенная — это, конечно же, самый большой объект, поэтому неудивительно, что наука космология, занимающаяся изучением строения и эволюции Вселенной в целом, не может обойтись без ОТО. О роли ОТО в космологии и о ее применимости к ранним эпохам жизни Вселенной пойдет речь в § 14.

Заканчивая этот параграф, следует отметить, что, несмотря на свою красоту и хорошее согласие с имеющимися экспериментами и наблюдениями, ОТО не является на сегодняшний день единственной теорией гравитации. Поэтому одна из задач экспериментаторов — постараться установить жизнеспособность других, так называемых альтернативных, теорий гравитации, описанию которых в самых общих чертах посвящен § 15.

Теперь мы переходим к конкретным следствиям ОТО в физических экспериментах и астрономических наблюдениях. Но прежде всего познакомимся с современным экспериментальным потенциалом нашей планеты.

§ 6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ ВЧЕРА И СЕГОДНЯ

В мире современной науки есть исследования, проведение которых абсолютно невозможно без солидного набора приборов. Возможностями, которые были доступны Архимеду и Ньютону, теперь уже никто не ограничивается (кроме, может быть, физиков-теоретиков), и хорошо оборудованная лаборатория так же необходима для продуктивного исследования, как пишущая машинка для написания отчета начальству.

А. Кон, М. Брейер, 1959 г.

Можно считать, что относительно сложные целенаправленные физические эксперименты в лабораторных условиях (на Земле) начал делать Галилео Га-

лилей еще в XVII веке. Мы не хотим умалить здесь роли его предшественников — естествоиспытателей Древней Греции. Однако древнегреческие ученые больше наблюдали доступные им физические явления и почти не пытались делать численные сопоставления между наблюдаемыми величинами и предсказаниями, вытекавшими из гипотез, записанных в виде формул. К первым таким физическим сопоставлениям нужно отнести работы современника Галилея — Иоганна Кеплера. Он, проанализировав данные наблюдений за движением планет, которые были выполнены его учителем Тихо Браге, смог установить количественные законы, получившие название законов Кеплера (см. § 10). (Затем Исаак Ньютон, основываясь на законах Кеплера, построил первую теорию тяготения.) Это были удивительно точные для того времени астрономические наблюдения. Позднее плеяда замечательных физиков-экспериментаторов — Г. Кавендиш, Ш. Кулон, Х. Эрстед, М. Фарадей и др. — заложила фундамент современной экспериментальной физики. Для того чтобы выполнить нашу задачу — описать, что сделано физиками-экспериментаторами, исследующими гравитационные явления, что ими делается сейчас и что, возможно, им удастся сделать в ближайшем будущем,— разумно хотя бы частично оценить, как вырос «измерительный потенциал» со времен Галилея до наших дней.

Чем же располагали, скажем, Галилей или Кеплер как экспериментаторы (точнее, как наблюдатели)? Во-первых, в их распоряжении были уже неплохие астрономические телескопы и человеческий глаз (прибор, обладающий замечательной чувствительностью). Во-вторых, в их распоряжении была Земля, точнее, ее весьма равномерное вращение,— иными словами, весьма стабильные часы. Поток света от яркой звезды или планеты, достигающий поверхности Земли, составляет в оптическом диапазоне около 10^{-9} Вт/см^2. Площадь окуляров телескопов Галилея и Кеплера была около 10^2 см^2. Это означает, что поток оптических квантов от ярких звезд или планет, достигавших глаза наблюдателя, составлял около 10^{12} квантов в секунду. А глаз уверенно регистрирует около 10^2 оптических квантов. Как стало ясно лишь в этом веке, Земля вращается неравномерно (есть и сезонные изменения угловой скорости, есть и монотонный дрейф). Но эти неравномерности не очень существенны даже для довольно точных измерений: относительные изменения угловой скорости вращения Земли $(\Delta\omega/\omega)_З$

в течение года порядка $1\cdot10^{-8}$. Эти величины дают представление о той весьма высокой точности, которой удалось достичь Тихо Браге и затем Кеплеру при определении периодов обращения планет, а Галилею — при наблюдении спутников Юпитера.

Чего же добились физики-экспериментаторы за 300 лет, прошедших после Галилея и Кеплера? Во-первых, были сделаны значительно более стабильные часы. Относительная нестабильность частоты водородного стандарта (более подробно о его устройстве будет рассказано в другом параграфе) составляет $\Delta\omega/\omega\approx3\cdot10^{-13}$. На такую величину отличаются частоты водородных стандартов разных стран, имеющих метрологическую службу *). Таким образом, «по сравнению с Землей» точность часов за 300 лет возросла на пять порядков. По существу «выиграно» даже больше. Дело в том, что в большинстве физических экспериментов нет необходимости знать все значащие цифры, как это требуется в метрологии. Достаточно быть уверенным в последних нескольких цифрах. Физики говорят, что большинство измерений — это измерения дифференциальные. Иными словами, регистрируется не сама величина, а лишь ее изменение. Два водородных стандарта частоты разных стран отличаются на три единицы тринадцатого знака, но эта разница (составляющая сотые доли герца) изменяется за довольно продолжительное время существенно меньше. Так, например, за тысячу секунд относительное изменение частоты водородного стандарта примерно в 300 раз меньше, т. е. $\Delta\omega/\omega\approx1\cdot10^{-15}$. А за такое довольно продолжительное время можно начать и кончить измерения. Из этого следует, что выигрыш по стабильности частоты за 300 лет составил около семи порядков.

С чувствительностью приемников электромагнитного излучения за это же время произошло следующее. В оптическом диапазоне создали фотоприемники, считающие отдельные кванты, а площадь телескопов в этом же диапазоне увеличили от ста квадратных сантиметров до трехсот тысяч квадратных сантиметров. Однако в радиоволновом диапазоне и примыкающем к нему со стороны коротких волн сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне достижения еще более впечатляющие. Действительно, во-первых, около сорока лет назад были созданы высоко-

*) Метрология занимается, в частности, измерением абсолютных значений временных интервалов и пространственных отрезков.

чувствительные приемники в СВЧ-диапазоне радиоволн ($f \approx 10^9 - 10^{10}$ Гц). Эти приемники (их иногда называют мазерами) имеют пороговую чувствительность, соответствующую нескольким радиофотонам. А фотоны в этом диапазоне длин волн на пять порядков «легче», т. е. несут меньшую энергию, чем фотоны оптического диапазона (энергия одного фотона в оптическом диапазоне примерно на пять порядков больше, чем энергия одного фотона в сверхвысокочастотном диапазоне). Во-вторых, были созданы радиотелескопы, площадь собирающего зеркала которых в 10^6 раз больше площади первой линзы телескопа Галилея.

Итак, если сравнивать полную чувствительность телескопов трехсотлетней давности (с учетом чувствительности глаза наблюдателя) с чувствительностью современных радиотелескопов, то можно сделать вывод, что последние примерно на тринадцать порядков чувствительнее. В действительности выигрыш может быть больше, если есть возможность длительно накапливать сигнал. Эти две цифры (семь порядков по стабильности частоты и тринадцать по чувствительности к потоку электромагнитного излучения) довольно ярко характеризуют активную работу физиков-экспериментаторов и астрономов-наблюдателей за последние триста лет. Здесь уместно отметить, что основные достижения в борьбе за чувствительность и стабильность относятся к последним сорока годам этого столетия. Конечно, не только этими двумя характеристиками заслуженно гордятся экспериментаторы. Придумано, отработано и воплощено в стандартные приборы множество качественно новых методов измерений. В частности, разработаны мощнейшие методы выделения сигналов из шумов, методы измерений в ядерной физике и физике элементарных частиц, созданы спутники Земли и Солнца и многое другое. Мы остановились здесь только на двух величинах, (чувствительности и стабильности), которые понадобятся нам в первую очередь для описания большого количества гравитационных экспериментов, выполненных сравнительно недавно.

Рассмотрим, что можно сделать в лаборатории, если в нашем распоряжении имеется чувствительный приемник и высокостабильный генератор электромагнитных колебаний. В большом числе гравитационных экспериментов необходимо измерять силы, действующие на массы. Если массы свободные (или слабо связанные), то силы приводят к ускорениям, которые в свою очередь

могут быть измерены по смещению за точно отмеренное время. Таким образом, задача обнаружения малой силы (или, что то же самое, малого ускорения) сводится к задаче регистрации малого механического смещения. Предположим, что в лаборатории нам необходимо измерить малое смещение Δx тела A относительно тела B. Один из способов осуществления такого измерения состоит в следующем: присоединим одну пластину плоского электрического конденсатора к телу A, а другую пластину — к B (рис. 11). Тогда изменение расстояния между

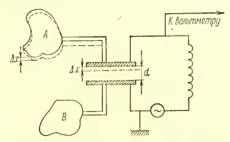


Рис. 11. Принципиальная схема емкостного датчика.

пластинами на величину Δx вызовет изменение электрической емкости C на такую же относительную величину:

$$\Delta C/C = \Delta x/d. \qquad (6.1)$$

Таким образом, задача измерения малого механического смещения свелась к измерению малого изменения электрической емкости. Эту вторую задачу легко осуществить следующим путем. Добавим к емкости индуктивность L, получится резонансный электрический контур с резонансной частотой, равной

$$\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC}. \qquad (6.2)$$

Изменение емкости приведет к изменению $\omega_{\text{рез}}$:

$$\frac{\Delta\omega_{\text{рез}}}{\omega_{\text{рез}}} \approx \frac{1}{2}\,\frac{\Delta C}{C} = \frac{1}{2}\,\frac{\Delta x}{d}. \qquad (6.3)$$

Проще всего измерить сдвиг резонансной частоты, если использовать электрический контур с высокой добротностью Q. Для того чтобы пояснить это новое для многих читателей понятие, представим себе, что мы хотим определить, чему равна резонансная частота $\omega_{\text{рез}}$ электрического контура. Пусть в нашем распоряжении имеется

электрический генератор с перестраиваемой частотой. Медленно изменяя частоту такого генератора, подсоединенного к контуру, можно получить наибольший размах (амплитуду) переменного напряжения в контуре, когда частота генератора $\omega_{ген}$ равна $\omega_{рез}$. Если же немного изменить частоту $\omega_{ген}$, т. е. «отстроить» генератор в сторону бо́льших или меньших частот, то амплитуда колебаний будет уменьшаться (рис. 12). Говорят, что резонансная кривая тем «острее», чем выше добротность электрического контура Q. Более строго понятие добротности Q определяют как отношение резонансной частоты $\omega_{рез}$ к полосе частот $\Delta\omega$, на краях которой амплитуда колебаний, измеряемая вольтметром, в два раза меньше, чем при резонансе *). Из этого описания очевидно, что самый простой способ измерить малый сдвиг $\omega_{рез}$, вызванный механическим смещением Δx, состоит в следующем: нужно настроить частоту $\omega_{ген}$ на самую крутую часть склона резонансной кривой и регистрировать малые изменения амплитуды электрического напряжения ΔU вольтметром (к которому, если необходимо, добавить высокочувствительный усилитель). Это описание метода измерений Δx может служить качественным обоснованием простой формулы, которая дает связь между относительным изменением расстояния между пластинами $\Delta x/d$ и относительным изменением амплитуды электрического напряжения:

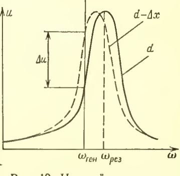


Рис. 12. Настройка генератора в емкостном датчике.

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{1}{2} Q \frac{\Delta C}{C} = \frac{1}{2} Q \frac{\Delta x}{d}. \qquad (6.4)$$

Из этого простого соотношения сразу становится видно, что, во-первых, для такого измерения необходим чувствительный приемник (для измерения малых величин ΔU), во-вторых, нужен высокостабильный генератор

*) Чем меньше затухание в контуре, тем выше добротность. Эту величину можно определить и другим образом: добротность равна числу периодов колебаний, в течение которых амплитуда колебаний убывает примерно в три раза.

электрического напряжения. Второе требование связано с тем, что изменение частоты генератора $\omega_{ген}$, так же как и смещение Δx, вызовет изменение ΔU (см. рис. 12). Отсюда следует требование к стабильности частоты:

$$\Delta\omega_{ген}/\omega_{ген} < \Delta x/d. \qquad (6.5)$$

Чем точнее выполняется это условие, тем лучше для наблюдателя: больше уверенности, что регистрируемое им ΔU вызвано именно смещением Δx, а не «ползанием» частоты генератора.

Итак, мы познакомились с так называемым емкостным датчиком малых смещений (или просто емкостным датчиком). Это, быть может, несколько громоздкое, описание простого способа измерения с помощью емкостного датчика мы закончим числовыми оценками.

Для того чтобы оценить, сколь малое Δx такой датчик позволяет зарегистрировать, нужно коротко сказать о том, какие добротности доступны экспериментаторам. В обычном радиоприемнике или телевизоре много электрических контуров (резонаторов); у них $Q \approx 100$—200. Как отмечено выше, добротность тем больше, чем меньше потери в емкости и индуктивности (меньше электрическое сопротивление). Поэтому, если изготовить электрический контур из сверхпроводящего материала (например, свинца или ниобия), у которого сопротивление постоянному току обращается в нуль вблизи температуры жидкого гелия, то можно ожидать резкого уменьшения сопротивления переменному току и, следовательно, высокой добротности. Действительно, практически без всяких особых тонкостей у таких электрических контуров, если охладить их до температуры жидкого гелия, можно достичь $Q \approx 1 \cdot 10^6$. Пусть в нашем распоряжении имеется цифровой вольтметр, который позволяет отсчитывать единицу пятого знака электрического напряжения (т. е. $\Delta U/U \approx 1 \cdot 10^{-5}$), и электрический контур с добротностью $Q \approx 10^6$. Воспользовавшись соотношением, связывающим $\Delta U/U$ с $\Delta x/d$, мы получим оценку $\Delta x/d \approx 2 \cdot 10^{-11}$. При зазоре в емкости, равном, например, одному микрометру (т. е. 10^{-4} см), емкостный датчик будет способен зарегистрировать $\Delta x \approx 2 \cdot 10^{-15}$ см! А для того чтобы он надежно работал, электрический генератор должен иметь относительную нестабильность частоты $\Delta\omega_{ген}/\omega_{ген} < 2 \cdot 10^{-11}$.

Как уже отмечалось выше, такой уровень нестабильности «с запасом» превзойден за короткое время у водо-

родного стандарта частоты $\Delta\omega_{ген}/\omega_{ген}\approx 1\cdot 10^{-15}$. Число $\Delta x\approx 2\cdot 10^{-15}$ см может смутить читателя, который вспомнит, что размер атома около 10^{-8} см, а ядра атома — 10^{-13} см. Однако физической бессмыслицы в возможности измерить такое малое смещение макроскопического тела A относительно другого (тоже макроскопического) тела B нет. В действительности мы говорим об измерении смещения большого коллектива атомов (порядка постоянной Авогадро). Кроме того, это измеряемое смещение есть результат относительно медленного процесса. Иными словами, в величину Δx не входят (не регистрируются датчиком) относительно быстрые (и существенно большие по абсолютной величине) колебания отдельных атомов и ядер. К вопросу о том, какие ограничения ставит квантовая механика в таких макроскопических измерениях, мы вернемся, когда в § 12 будем обсуждать гравитационные антенны.

Заметим, что в рассмотренном численном примере была использована оценка $\Delta U/U\approx 1\cdot 10^{-5}$. Ясно, что малость $\Delta U/U$ определяется чувствительностью усилителя, применяемого в таких измерениях. Сейчас уже надежно отработана методика измерения механических колебаний (со звуковой частотой), позволяющая различать размах колебаний $2\cdot 10^{-17}$ см при времени усреднения 10 с.

Перейдем теперь к измерению малых механических смещений, когда в качестве лаборатории используется вся Солнечная система. Речь пойдет о том, с какой точностью определяется некоторое расстояние L от Земли до спутника или между спутниками. Представим себе, что от наземной антенны выпущен импульс СВЧ электромагнитного излучения в сторону спутника. Если на спутнике есть ретранслятор (т. е. антенна, приемник с усилителем, выход которого также соединен с антенной спутника), то через время $2L/c$ ($c=3\cdot 10^5$ км/с) на наземной антенне можно зарегистрировать «отраженный» таким образом от спутника импульс и, измерив интервал времени, точно определить расстояние L. Чтобы «измерить интервал времени», необходимо выяснить, как «хранить время» или, точнее, как хранить единицу времени.

Сначала (до середины 40-х годов нашего столетия) «хранителем» единицы времени была Земля (интервал времени, соответствующий ее одному обороту, либо доли его). Когда были созданы атомные стандарты частоты, а затем водородный стандарт (тоже атомный), стало оче-

видным, что Земля вращается неравномерно, роль «хранителя» единицы времени перешла к этим лабораторным источникам высокостабильных колебаний. Единицей времени сейчас является интервал, в течение которого происходит заранее оговоренное число периодов колебаний такого автогенератора. Для того чтобы измерить расстояние L, нужно сосчитать количество периодов колебаний, которое пройдет за то время, пока импульс электромагнитных волн будет двигаться туда (до спутника) и обратно (до наземной антенны), затем умножить определенное таким образом время на скорость распространения электромагнитных волн в вакууме (скорость света) и полученное произведение поделить на два. В такой процедуре измерения расстояния L погрешность ΔL будет определяться простым соотношением:

$$\Delta L/L \gtrsim \Delta\omega_{\text{ген}}/\omega_{\text{ген}}. \qquad (6.6)$$

Если нас интересует так называемая метрологическая точность, т. е. мы хотим знать все значащие цифры в значении L, то необходимо пользоваться для определения ΔL приведенной выше оценкой для водородного стандарта $\Delta\omega_{\text{ген}}/\omega_{\text{ген}} \approx 3 \cdot 10^{-13}$. В случае, когда $L = 300$ млн. км $= 3 \cdot 10^{13}$ см (удвоенное расстояние от Земли до Солнца), следует ожидать, что $\Delta L \approx 9$ см. Реальная достигнутая сегодня метрологическая точность в таких измерениях примерно на один порядок хуже (т. е. $\Delta L \approx$ ≈ 1 м). Причин в расхождении несколько. Во-первых, во всех предшествующих рассуждениях мы исходили из того, что довольно слабый сигнал, «отраженный» от спутника, принимается без всяких искажений (иными словами, что в нашем распоряжении имеется приемник без шумов). А реальный приемник такие искажения вносит. Во-вторых, не было учтено, что электромагнитному импульсу, хотя и короткое время, приходится проходить через атмосферу, а все остальное время импульс распространяется не в идеальном вакууме, а в межпланетной плазме. Эти две основные причины (есть еще и менее значительные) приводят к тому, что метрологическая погрешность в определении межпланетных расстояний составляет около 1 м. Еще более впечатляющих точностей достигли при так называемых дифференциальных измерениях, т. е. при измерениях не самой величины, а лишь ее малых изменений. В этом случае важна не метрологическая стабильность частоты, а кратковременная, которая, как отмечалось выше, существенно лучше. За

время порядка одной минуты удается различать смещения наземной антенны относительно антенны спутника, меньшие 1 см.

Этот рассказ — иллюстрацию об «измерительном потенциале», созданном на сегодняшний день физиками-экспериментаторами,— мы завершим еще одним простым примером. Предположим, что нам необходимо измерить с Земли не только координаты спутника, но и его скорость. Для того чтобы выполнить такое измерение, достаточно воспользоваться эффектом Доплера. Сущность этого эффекта сводится к следующему. Пусть в нашем распоряжении имеются два одинаковых достаточно стабильных (по частоте) источника (генератора) электромагнитных волн, движущихся относительно друг друга. Наблюдатель, неподвижный относительно одного из генераторов, обнаружит разницу в принимаемых частотах. Знак этой разницы зависит от направления взаимного движения. Если один генератор удаляется, то наблюдатель будет регистрировать понижение («покраснение») частоты, если приближается — повышение («поголубение»). Относительный сдвиг частоты, вызванный этим эффектом, подчиняется простой формуле:

$$(\Delta\omega/\omega)_{\text{D}} = \pm\, v/c, \qquad (6.7)$$

где v — скорость движения одного генератора относительно другого (знак зависит от того, что происходит — сближение или удаление). Ясно, что возможность измерить v с помощью этого эффекта зависит в первую очередь от того, насколько стабильна частота автогенераторов. Если нас интересует метрологическая точность в измерении v, то очевидно, что пределом будет

$$\Delta v_{\text{метр}} \approx (\Delta\omega_{\text{ген}}/\omega_{\text{ген}})_{\text{метр}} \cdot c \approx 1\cdot 10^{-2}\ \text{см/с}. \qquad (6.8)$$

По причинам, аналогичным приведенным выше для измерения расстояний, реальная погрешность несколько больше (Δv около 0,1 см/с). Однако для дифференциальных измерений, где не важны все значащие цифры, погрешность меньше. Сейчас производятся отсчеты вариаций скорости космического корабля, находящегося на расстоянии более 10^9 км от Земли, с погрешностью в каждом отсчете около $3\cdot 10^{-4}$ см/с при времени усреднения 50 с. При этом сама скорость корабля относительно Земли превышает вторую космическую ($v > 11{,}2$ км/с).

Читатель (по-видимому, заранее уверенный в том, что физики-экспериментаторы сегодня могут измерять нам-

ного точнее, чем во времена Галилея) должен рассматривать этот раздел книги лишь как иллюстрацию. На немногих страницах невозможно описать все, что делают и могут сделать физики-экспериментаторы в настоящее время. В каждый последующий параграф мы будем включать небольшие дополнения, которые, как авторы надеются, позволят понять и ощутить изящество и остроумие многих выполненных недавно гравитационных опытов.

§ 7. СКОЛЬКО БЫВАЕТ СОРТОВ МАСС

Разность скоростей движения в воздухе для шаров из золота, свинца, меди, порфира и других тяжелых веществ столь ничтожна, что при падении с высоты 100 локтей (около 46 м) золотой шар не обгонит медный и на четыре пальца. Установив это из наблюдений, я пришел к выводу, что в среде, не оказывающей никакого сопротивления, все тела будут падать с одинаковой скоростью.

Галилео Галилей

Проверка принципа эквивалентности производилась относительно большое количество раз. Можно считать, что первым, кто целенаправленно проверял этот принцип, был сам Ньютон (хотя и до Ньютона этой проблемой уже занимались). Опыты Ньютона были по существу очень простыми: он сравнивал периоды колебаний маятников, состоявших из тонкой нити (с очень малой собственной массой) и массивного шарика на конце. Шарики были изготовлены из разных материалов. С относительно высокой точностью (около $1 \cdot 10^{-3}$) в пределах погрешности измерений Ньютон установил равенство отношений инертной и гравитационной (тяжелой) масс. Идея опыта Ньютона станет понятной из следующего рассуждения. Читатель знает из школьного учебника по физике, что период колебаний математического маятника τ_0 равен

$$\tau_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \qquad (7.1)$$

где l — длина нити, а g — ускорение свободного падения. Для того чтобы в лаборатории создать нечто похожее на математический маятник, необходимо взять достаточно плотный материал, изготовить из него шарик, а затем шарик подвесить на возможно более тонкой нити. Диаметр шарика должен быть много меньше длины нити. Если измерить период малых колебаний такого реального физического маятника, то окажется, что он очень мало отличается от τ_0, вычисленного по формуле (7.1). В школь-

ном учебнике по физике умалчивается о том, что вывод формулы (7.1) основан на принципе эквивалентности. Действительно, для малых колебаний точечной массы на невесомой нити длиной l в гравитационном поле с ускорением свободного падения g следует записать второй закон Ньютона так:

$$m_{\text{ин}} \frac{d^2 (l\alpha)}{dt^2} = - m_{\text{гр}} g\alpha = - \frac{G m_{\text{гр}} (M_{З})_{\text{гр}} \alpha}{R_{З}^2}, \qquad (7.2)$$

где α — малое угловое отклонение маятника. Слева стоит инертная масса $m_{\text{ин}}$, а справа — гравитационная, $m_{\text{гр}}$. Решение уравнения (7.2) имеет вид гармонических колебаний с периодом

$$\tau_0 = 2\pi \sqrt{\frac{g}{l} \cdot \frac{m_{\text{гр}}}{m_{\text{ин}}}}. \qquad (7.3)$$

Как видно из сравнения формул (7.1) и (7.3), первая (школьная) формула для периода колебаний математического маятника предполагает, что принцип эквивалентности выполняется точно. Очевидно, что строгая формула (7.3) по существу дает рекомендацию, как проверить принцип эквивалентности: необходимо изготовить несколько маятников с одинаковыми l и шариками из разных веществ и измерить периоды их собственных колебаний. Если периоды совпадут, то одинаковы и отношения $m_{\text{ин}}/m_{\text{гр}}$ для использованных веществ. Этот результат и был получен Ньютоном.

Спустя много лет качественного скачка в повышении точности при проверке принципа эквивалентности удалось добиться выдающемуся венгерскому ученому Р. Этвешу (его имя носит Университет в Будапеште). В опытах Этвеша в начале этого столетия было показано, что для различных веществ отношения $m_{\text{ин}}/m_{\text{гр}}$, если и отличаются, то не более чем на несколько единиц седьмого знака. Разрешение, достигнутое Этвешем в последующих опытах, было превзойдено довольно существенно, и теперь принципу эквивалентности «доверяют» для обычных (доступных в наземной лаборатории) тел вплоть до уровня $1 \cdot 10^{-12}$.

Прежде чем коротко описать эти последние опыты, необходимо определить, с какой точностью (с каким разрешением) имеет смысл проверять принцип эквивалентности. Получить однозначный ответ на этот вопрос не очень-то просто, так как необходимы некоторые физичес-

кие гипотезы, в которых содержались бы размерные или безразмерные величины, связанные с инертной и гравитационной массами. Очевидно, что в ОТО такой гипотезы нет, так как принцип эквивалентности как постулат является ее основой.

Американский физик Р. Дикки предложил количественный подход к оценке точности, необходимой при проверке принципа эквивалентности. Рассуждения Дикки сводятся к следующему: для некоторой массы обычного вещества можно записать пропорции, в которые входят массы-энергии, соответствующие разным, известным физикам, видам взаимодействия. Читателю в начале этой книги уже напоминалось, что физики знают четыре вида взаимодействий: ядерное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Для любого тела в лаборатории массой около 1 кг и плотностью порядка 1 кг/дм^3, можно записать такие пропорции:

$$1:(10^{-2}-10^{-3}):(10^{-11}-10^{-14}):(10^{-28}-10^{-30}).$$

В этой пропорции за единицу принята масса, соответствующая сильному (ядерному) взаимодействию. Приближенно эта величина пропорциональна сумме масс протонов и нейтронов *). Масса-энергия, соответствующая электромагнитному взаимодействию (электростатическая потенциальная энергия «склеенных» ядерными силами протонов в ядре и энергия взаимодействия протонов и электронов), составляет доли процента от массы, соответствующей сильному взаимодействию. Масса, соответствующая слабому взаимодействию, составляет 10^{-11}—10^{-14}, а масса, соответствующая гравитационному,— 10^{-28}—10^{-30} часть от сильного взаимодействия. В этой пропорции Дикки нет уточнения, о какой массе идет речь—об инертной или гравитационной. Однако есть некоторая систематизация «сортов» масс — по известным видам взаимодействия. Если взять два тела из разных веществ (например, с разным отношением числа протонов к числу нейтронов в ядре), то можно заранее сказать, что у этих

*) Согласно современным представлениям физики элементарных частиц протоны и нейтроны не такие уж «элементарные» частицы — они состоят из так называемых кварков. Все свойства протонов и нейтронов, в том числе и их масса покоя, определяются характером взаимодействия кварков друг с другом, вот почему мы связываем массы покоя протонов и нейтронов с сильным взаимодействием, не имея возможности в рамках данной книги остановиться на этом вопросе более подробно.

тел разное отношение вклада в полную массу различных взаимодействий. Если принцип эквивалентности не является общим, то можно предположить, например, что отношения инертной массы к гравитационной для сильного и электромагнитного взаимодействий не совпадают. Тогда следовало бы ожидать, что опыт Ньютона с двумя маятниками, изготовленными из веществ, соответствующих далеко отстоящим элементам в таблице Менделеева, даст положительный результат: маятники с одинаковыми l имели бы разный период. Как уже читатель знает, результаты этого опыта и последовавших за ним — отрицательные. Однако, используя систематику Дикки, можно численно оценить важность того или другого уровня разрешения, достигнутого при проверке принципа эквивалентности. Сейчас, на основании опытных данных, обычно говорят, что принцип эквивалентности проверен «на уровне» слабого взаимодействия (в наземных лабораторных опытах) и «на уровне» гравитационного взаимодействия (в космическом эксперименте).

Остановимся кратко на двух опытах, в которых была достигнута наилучшая точность. В первом из них, выполненном в Московском государственном университете, был использован прием, предложенный Р. Дикки.

В чем же сущность этого приема?

Как известно, Земля падает на Солнце с ускорением 0,6 см/с^2. Это падение не завершается катастрофой для Земли из-за начальных условий (величины и направления вектора начальной скорости): она «промахивается» мимо Солнца и это систематическое «промахивание» вместе с падением и образует примерно круговую орбиту Земли.

Вблизи Земли гравитационное поле Солнца можно считать однородным. Проверить принцип эквивалентности согласно Дикки удобно следующим способом (рис. 13). Поместим на концах коромысла крутильного маятника две одинаковые массы из двух разных веществ (в опыте, описанном выше, использовались алюминий и платина). Если у этих двух масс ускорения падения на Солнце различны, то они должны были бы закручивать коромысло маятника. Так как одновременно с обращением вокруг Солнца Земля еще совершает вращение вокруг собственной оси, то в разное время суток по отношению к наземному наблюдателю маятник должен закручиваться в разные стороны. Несложный расчет, который мы здесь не приводим, показывает, что

маятник должен периодически по гармоническому закону закручиваться; при этом амплитуда смещения положения концов грузов от положения равновесия должна составлять примерно

$$\Delta l \approx A \frac{a_{\odot}}{4\pi^2} \tau_0^2, \qquad (7.4)$$

где $a_{\odot}=0,6$ см/с^2 — гравитационное ускорение к Солнцу на орбите Земли, τ_0 — период собственных колебаний

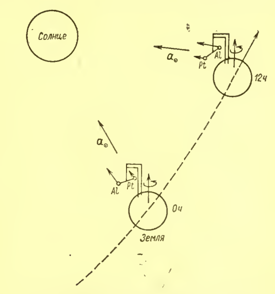


Рис. 13. Принципиальная схема опыта по проверке принципа эквивалентности.

маятника, A — предполагаемая относительная разность ускорений свободного падения на Солнце между платиной и алюминием.

Приведенное выражение, справедливое при условии, что τ_0 меньше земных суток, дает первую рекомендацию: чтобы измеряемый эффект был заметнее, необходимо увеличивать период собственных колебаний, тогда будет меньше трудностей в создании системы регистрации малых смещений Δl. В описываемом опыте значения $\tau_0=5$ ч 20 мин$\approx 1,9\cdot 10^4$ с. Если подставим в формулу (7.4) это значение τ_0 и $A\approx 1\cdot 10^{-12}$, то мы получим $\Delta l\approx$ $\approx 5\cdot 10^{-6}$. А эта величина относительно легко измерима.

В реальном опыте вместо двух масс были использованы восемь (рис. 14): четыре из платины и четыре из алюминия. Тем самым было ослаблено влияние операторов (и прохожих в коридоре), которые могли за счет собственной массы раскачать крутильный маятник. Однако при этом значение Δl было несколько меньше, чем приведенное выше при $A \approx 1 \cdot 10^{-12}$. Для регистрации таких колебаний луч гелий-неонового лазера направлялся на зеркало, укрепленное в центре коромысла весов. Отраженный луч попадал на медленно вращающийся барабан с фотопленкой. Для увеличения смещения пятна «световое плечо» лазера было выбрано довольно большим — около 50 м. После проявления пленок оператор определял значение амплитуды колебаний коромысла с периодом, равным земным суткам, и фазой, которой соответствовали бы максимумы в полдень и полночь.

Рис. 14. Принципиальная схема установки для проверки принципа эквивалентности: *1* — вольфрамовая нить толщиной 5 мкм, *2* — зеркало, *3* — лазер, *4* — барабан с фотопленкой, *5* — вакуумная камера.

Семь суточных записей дали такой разброс значений амплитуд, что можно было сделать вывод о справедливости принципа эквивалентности для платины и алюминия по крайней мере с точностью до $1 \cdot 10^{-12}$. Из пропорций для «разных сортов» масс, приведенных выше, следует, что доля массы, «ответственная» за слабое взаимодействие, и основная часть массы, связанная с сильным взаимодействием, падают с одним и тем же ускорением, т. е. принцип эквивалентности справедлив не только для сильного, но и для слабого взаимодействия.

В описанном опыте было «выжато» почти все, чего можно добиться в земных лабораторных условиях. Приведем несколько деталей эксперимента: коромысло крутильных весов было подвешено на проволоке диаметром $5 \cdot 10^{-4}$ см (примерно в 10 раз тоньше человеческого волоса), сами весы были помещены в камеру с давлением меньше 10^{-11} атм, которая в свою очередь тщательно экранировалась от вариаций температуры и от магнитного поля.

Время затухания колебаний крутильного маятника было больше двух лет. Это позволило существенно ослабить помехи, вызванные тепловыми механическими шумами (несколько более подробно об этой проблеме будет рассказано в § 12). Совершенствование такой процедуры измерений, возможно, позволило бы повысить разрешение на 1-2 порядка; но этого недостаточно для того, чтобы проверить справедливость принципа эквивалентности «на уровне гравитационного взаимодействия», которое для тел, доступных экспериментатору в наземной лаборатории, составляет (как это отмечалось выше) 10^{-28}—10^{-30}.

Относительно недавно был завершен еще один опыт по проверке принципа эквивалентности, в котором в качестве «пробных тел» были использованы Луна, Земля и Солнце. В этом эксперименте принимали участие несколько лабораторий в США. Внешне эксперимент напоминал схему лабораторного опыта (см. рис. 13), описанного выше, только роль куска платины выполняла Земля, а куска алюминия — Луна. В свободном падении на Солнце эти два «пробных тела» попутно обращаются вокруг общего центра масс.

Если свободное падение Земли и Луны на Солнце и свободное падение их друг на друга совершаются без нарушения принципа эквивалентности, то изменение расстояния между ними будет точно подчиняться ньютоновской механике с одной и той же гравитационной постоянной G. Вместе с тем расстояние Земля — Луна можно определить очень точно, измеряя время движения лазерного импульса от источника на Земле до уголковых отражателей, оставленных на поверхности Луны советскими луноходами и американскими экспедициями «Аполлон». После того как точность такой лазерной локации достигла нескольких сантиметров, оказалось возможным с большим разрешением проверить принцип эквивалентности для масс Земли и Луны. Специфика этого эксперимента состоит в том, что вклад гравитационной энергии такого тела, как Земля, в полную массу относительно велик. Для Земли отношение массы, связанной с ее собственным гравитационным полем, к ее полной массе примерно равно $4{,}6 \cdot 10^{-10}$, для Луны это отношение — $0{,}2 \times \times 10^{-10}$, что на 18 порядков больше, чем у любой массы в лаборатории на Земле.

Основной результат эксперимента с Землей, Луной и Солнцем можно сформулировать следующим образом:

отношение гравитационной массы, связанной с гравитационным полем Земли, к ее инертной массе такое же, как и для обычных лабораторных тел. Это утверждение справедливо с точностью до погрешности измерений, составившей 1,5%.

В добавление к этому очень краткому описанию эксперимента укажем, что само измерение расстояния Земля — Луна продолжалось в течение четырех лет. При измерениях учитывались неоднородности в распределении масс по объему Луны и Земли, вариации угловых скоростей Луны и Земли, амплитуда приливных волн в земной коре и либрация (покачивание относительно оси вращения) Луны.

Подводя итоги изложенному, можно сказать, что отношение инертной массы к гравитационной для сильного и гравитационного взаимодействий с очень высокой точностью одно и то же. До настоящего времени еще не выполнены измерения с антиматерией, хотя косвенные соображения показывают, что и для нее принцип эквивалентности должен быть справедлив.

§ 8. КАК «КРАСНЕЮТ» И «ГОЛУБЕЮТ» ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

...свет, обладая инертной массой, теряет энергию на преодоление гравитационного притяжения... потеря светом энергии означает увеличение его длины волны.

Дж. Орир «Популярная физика»

Начиная с этого параграфа читателю будет предложено описание наиболее интересных и важных экспериментов, в которых были изучены различные гравитационные явления. По существу речь пойдет о проверках эффектов, вытекающих из общей теории относительности. Это описание занимает значительную часть всего объема книги, и этим обстоятельством оправдан подзаголовок книги: «Как измеряют кривизну мира». Авторы решили включить в каждый раздел и некоторое количество «технических деталей», иными словами, выполнить обещание, данное в § 6, — продолжить рассказ об «экспериментальном потенциале нашей планеты», т. е. дать читателю представление о том, что и с какой точностью умеют измерять физики-экспериментаторы сегодня.

В этот параграф «вошли» два эксперимента: изучение поведения электромагнитных волн и электромагнитных генераторов в статическом гравитационном поле.

18 июня 1976 г. с восточного побережья северо-американского континента была запущена ракета с водородным стандартом частоты на борту. Длительность ее полета составила около двух часов. Во время полета в апогее ракета достигла высоты около 10^4 км (по вертикали). Полет закончился тем, что она упала примерно в центре северной Атлантики, немного восточнее Бермудского треугольника. Это была последняя и решающая часть эксперимента, который в течение пяти лет готовил профессор Р. Вессо вместе со своими коллегами. Цель эксперимента заключалась в том, чтобы проверить одно из следствий ОТО: изменение частоты фотонов, падающих в гравитационное поле.

Прежде чем перейти к подробному описанию того, что измерено и как измерено в тот июньский день, рассмотрим принципиальную сторону вопроса. Начнем с простой модели. Представим себе, что шарик массой m падает с высоты H на Землю. В самом начале падения шарик имел по отношению к поверхности Земли потенциальную энергию mgH (g — ускорение свободного падения). У самой поверхности потенциальная энергия превращается в кинетическую, и можно записать равенство

$$mgH = mv^2/2. \qquad (8.1)$$

Теперь представим себе, что вместо шарика с некоторой высоты H мы «выпустили» (точнее, излучили вниз) один фотон, энергия которого $\hbar\omega$, где $\hbar$ — постоянная Планка. Если воспользоваться формулой $E=mc^2$ (см. § 3) и приравнять E к $\hbar\omega$, то следует считать, что фотон имеет массу $m=\hbar\omega/c^2$. Отметим, что эта масса не похожа на массу шарика. У фотона есть масса только в движении и, как говорят, нет массы покоя. При движении вниз масса фотона все время находится в ускоряющем поле Земли $\boldsymbol{g}$, и ее потенциальная энергия убывает. Предположим, что со скоростью движения ничего не происходит, т. е. она одна и та же наверху и внизу (это «очевидное» допущение требует добавочного анализа). Тогда остается лишь одна возможность для удовлетворения закона сохранения энергии: предположить, что изменение потенциальной энергии фотона в поле тяжести Земли превратится в изменение энергии самого фотона. А так как энергия фотона пропорциональна его частоте, то должен произойти сдвиг частоты $\Delta\omega_{гр}$:

$$\hbar\Delta\omega_{гр} = (\hbar\omega/c^2)\, gH. \qquad (8.2)$$

Ясно, что при «падении» фотона сверху вниз должно наблюдаться повышение частоты или, как говорят, «голубое» смещение, т. е. сдвиг частоты в голубую сторону, а при движении фотона снизу вверх должно наблюдаться «покраснение» фотона — сдвиг частоты в красную сторону или, как говорят, «красное» смещение.

В написанном выше равенстве (8.2) постоянная Планка сокращается. В таких случаях физики-теоретики говорят, что эффект не квантовый, а чисто классический. Равенство (8.2) удобнее переписать в таком виде:

$$\Delta\omega_{\text{гр}}/\omega = gH/c^2 = \Delta\varphi/c^2. \qquad (8.3)$$

Здесь вместо произведения gH написана равная этому произведению разность гравитационных потенциалов $\Delta\varphi$ вблизи поверхности Земли на высоте H и на нулевой высоте. Приведенный вывод нужно рассматривать лишь как иллюстрацию, так как он основан на ряде допущений (одно из них мы выделили). Из ОТО можно получить точный аналитический ответ на вопрос о том, что произойдет с частотой фотона, движущегося в статическом гравитационном поле. Ответ тот же, что и (8.3).

Итак, для проверки эффекта красно-голубого смещения частоты нужны два генератора с одинаковыми (или очень близкими) частотами. Один из генераторов нужно поднять повыше и затем, дав возможность им излучать электромагнитные волны, сравнить две частоты. Очевидно, что этот эффект невелик. Действительно, если подставить в формулу $H=20$ м, то ответ будет $\Delta\omega_{\text{гр}}/\omega\approx$ $\approx 2\cdot 10^{-15}$. Именно на такой разнице высот за 16 лет до описываемых событий (в 1959—1960 гг.) и была выполнена первая проверка этой простой формулы для красно-голубого смещения *). Результат опыта был удовлетворительным: формула «работала» правильно, число, измеренное приближенно, совпало с числом из формулы. Однако точность была не слишком удовлетворительной — около 5% от величины эффекта.

Экспериментаторы, проверяющие физическую теорию, как правило, такой точностью не удовлетворяются. Именно поэтому, чтобы иметь «запас прочности», было решено использовать ракету, с тем чтобы сам эффект был существенно больше. В опыте 1976 г. разности высот в 10 тыс. км соответствует $\Delta\varphi/c^2\approx 4{,}5\cdot 10^{-10}$, т. е. примерно

*) Знаменитый опыт Паунда и Ребки, а затем Паунда и Снайдера.

на пять порядков больше. Для этого опыта был изготовлен специальный водородный стандарт частоты, который можно было разместить на борту ракеты. Его относительные уходы частоты в течение двух часов (это дольше, чем время эксперимента) не превышали $5\cdot10^{-15}$. Если сравнить это значение с ожидаемым эффектом $\Delta\varphi/c^2\approx4{,}5\times\times10^{-10}$, то можно было бы рассчитывать на точность около 0,001 %. К сожалению, в таких (да и во многих других) физических опытах всегда найдется несколько причин, по которым полный резерв чувствительности (или разрешения) не реализуется до конца. Так было и в этом опыте. Относительная погрешность в сличении сдвига частоты водородного стандарта частоты на борту ракеты и двух одинаковых стандартов частоты на Земле около $2\cdot10^{-4}$(т. е. 0,02% от ожидавшегося сдвига $\Delta\omega_{\text{ген}}$, действительно составившего $\approx4{,}5\cdot10^{-10}\ \omega_{\text{ген}}$). Самым приятным и для экспериментаторов и для теоретиков, ожидавших ответа, было то, что в пределах ошибки измерений никаких отклонений от предсказания ОТО обнаружено не было. Иными словами, формула (8.3) «работает» очень точно. В этом состоит основной результат завершенного в 1976 г. эксперимента, который так же, как и эксперименты 1959—1960 гг., теперь стал малой частью великой истории экспериментальной физики.

У читателя не должно создаться впечатления, что описанный опыт был простым. Проста лишь его принципиальная схема, описанная выше. Поэтому авторы решили добавить несколько кратких деталей. Сначала опишем (как это было обещано в § 6) устройство водородного стандарта частоты. Внешне этот прибор напоминает средних размеров бочку (рис. 15), внутри которой довольно высокий вакуум около 10^{-8} торр (плотность разреженного газа на 11 порядков меньше, чем в обычных условиях). «Начальная точка» водородного стандарта — это металлическая трубочка, закрытая с одной стороны губчатой платиной. Трубочка открытым концом подсоединена к баллону со сжатым водородом. Закрытый губчатой платиной конец трубочки нацелен внутрь бочки вдоль ее оси. Из платинового фильтра в вакуум вытекает тонкая струя атомов водорода (около 10^{16} атомов в секунду).

Сначала эта струя попадает в область между металлическими электродами, к которым подведено переменное высокочастотное напряжение. В этой области электрическое поле возбуждает атомы водорода. Их становится

больше на верхних квантовых уровнях по сравнению с тем распределением, которое устанавливается при тепловом равновесии. Заодно в этом поле разбиваются и молекулы водорода. Далее струя таких возбужденных атомов попадает в область, где с помощью постоянных магнитов создается весьма неоднородное магнитное поле. Это магнитное поле разделяет атомы водорода: атомы, находящиеся на верхнем уровне,— фокусирует, а атомы, находящиеся на нижнем,— дефокусирует (рассеивает). Не-

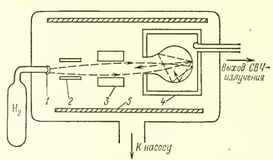


Рис. 15. Принципиальная схема водородного стандарта частоты: *1* — наконечник из губчатой платины, пропускающий водород, *2* — высокочастотное возбуждение пучка атомов водорода, *3* — источник сильного неоднородного магнитного поля, *4* — СВЧ-резонатор, настроенный на частоту $1{,}4\cdot10^9$ Гц, *5* — магнитный экран.

однородное магнитное поле так «избирательно относится» только к двум определенным квантовым состояниям атома водорода. В одном из этих состояний «оси вращения» протона и электрона параллельны (говорят — спины параллельны), а в другом — антипараллельны. Если атом водорода перейдет из первого состояния во второе, то этот переход будет сопровождаться излучением радиофотона, частота которого приближенно равна $1{,}4\cdot10^9$ Гц. Это и есть частота водородного стандарта.

Сфокусированная часть струи атомов водорода, в основном состоящая из атомов, находящихся на верхнем из двух описанных выше уровней, попадает в отверстие в СВЧ-резонаторе, который настроен на частоту этого перехода. После примерно ста тысяч столкновений со стенками резонатора атом водорода вылетает из резонатора через то же отверстие и таким образом «выбывает из игры». Его дальнейшая судьба — быть удаленным из объема, он будет поглощен мощным вакуумным насосом.

В резонаторе число возбужденных атомов около 10^{12} и каждый из них проводит там около одной секунды. Этих условий — атомы на верхнем уровне и резонатор, настроенный на частоту квантового перехода,— достаточно для того, чтобы сработал так называемый мазерный эффект: атомы излучают радиофотоны когерентно (строго в фазе) на частоте, очень близкой к частоте квантового перехода. Такова принципиальная схема устройства водородного стандарта частоты.

В этом описании мы опустили множество «мелких деталей», которые, однако, играют весьма важную роль, если нужно иметь стабильность частоты на уровне $\Delta\omega/\omega \leqslant 5 \cdot 10^{-14}$. Для иллюстрации роли этих «деталей» укажем, что постоянное магнитное поле в резонаторе должно быть меньше 10^{-3} Гс. Следовательно, нужны магнитные экраны и датчики контроля величины напряженности магнитного поля. Второе условие для достижения такого уровня стабильности частоты — исключить изменение температуры стенок резонатора вплоть до уровня $\Delta T < 0{,}01$ °C.

В заключение описания эксперимента 1976 г. отметим еще несколько важных дополнительных измерений, которые пришлось выполнять во время полета ракеты. Главной задачей во время измерений было исключить эффект Доплера — сдвиг частоты из-за разных скоростей бортового генератора и наземных генераторов (об этом эффекте было рассказано в § 6). Легко оценить, что сдвиг частоты из-за этого эффекта на много порядков больше, чем ожидаемое значение $4{,}5 \cdot 10^{-10}$ ω. Во время полета шли непрерывные локационные измерения положения ракеты с нескольких наземных станций. Ее положение измерялось с точностью до 1 м, а скорость — с точностью до нескольких сантиметров в секунду. Кроме этих измерений авторам проекта пришлось выполнить еще довольно много дополнительных проб и проверок.

Перейдем теперь ко второму эксперименту, который можно считать «близким родственником» только что описанного. Предварим его кратким рассказом о постановке проблемы. Проблема в несколько упрощенном виде сводится к следующему простому вопросу: как влияет гравитационное поле на темп хода часов? Пусть в нашем распоряжении имеется пара часов. Синхронизуем эти часы в одном месте (см. § 3), а затем поместим их на некоторое время τ в две лаборатории, отличающиеся гравитационным потенциалом на величину $\Delta\varphi$ (если лаборатории

находятся на Земле на разных высотах, то $\Delta\varphi = gH$). По прошествии времени τ часы можно свезти опять в одно место и «сличить» показания стрелок. Общая теория относительности дает однозначный ответ на этот вопрос: гравитационное поле окажет влияние на темп хода часов (независимо от их природы); разность показаний часов будет равна

$$\Delta\tau = \tau \frac{\Delta\varphi}{c^2}. \tag{8.4}$$

Сравнивая эту формулу с формулой (8.3) для сдвига частоты в гравитационном поле, можно заметить, что эти два эффекта — «близкие родственники». Различие состоит в том, что в случае сдвига частоты измеряется разность частот, а «сличение» показания стрелок часов соответствует сдвигу фаз (т. е. интегралу по времени от сдвига частоты). ОТО также предсказывает и знак эффекта: часы, расположенные выше (дальше от поверхности Земли), будут идти «быстрее». Если подставить в эту формулу $\tau = 14$ ч, $H = 10$ км, то $\Delta\tau$ должно быть равно примерно $50 \cdot 10^{-9}$ с $= 50$ нс.

Как отмечалось в § 6, самые стабильные часы — это атомные стандарты частоты и лучший среди них — водородный стандарт. Они и были использованы в двух экспериментах, выполненных независимо, примерно в одно и то же время двумя группами экспериментаторов (итальянскими и американскими). Первые отвезли на грузовике несколько стандартов частоты высоко в горы, а по прошествии нескольких часов привезли обратно и сличили с другими стандартами частоты, которые оставались в долине. Формула «сработала» верно — с точностью до 5% (погрешность измерения). Опережение по времени «горных» часов совпало с вычисленным по формуле из ОТО.

Американские физики поместили несколько стандартов частоты на самолет и «заставили» его непрерывно летать около 14 часов. И в их эксперименте было получено подтверждение этого эффекта ОТО, однако с лучшей точностью (около 1%). Интересной особенностью второго эксперимента было то, что измерялась разность двух эффектов: изменение темпа хода часов, вызванное разницей гравитационных потенциалов, и изменение темпа хода часов, вызванное тем, что «самолетные» часы были в движении, и, следовательно, их нужно было сначала ускорить до 400 км/ч (такова скорость самолета, использованного в эксперименте), а затем затормозить.

Специальная теория относительности СТО, см. § 3) позволяет рассчитать, как меняется темп течения времени в ускоренных неинерциальных системах отсчета. Подчеркнем, что этот эффект не следует путать с тем, что время в различных инерциальных системах отсчета течет по-разному. В случае двух наблюдателей в двух инерциальных системах отсчета каждый наблюдатель считает, что часы другого идут медленнее. Чтобы выяснить все же, кто из них «прав», одному из наблюдателей необходимо испытать сначала ускорение, затем замедление и в итоге оказаться неподвижным относительно второго наблюдателя. При этом в ходе ускорения и замедления набежит именно такая разность в показании часов, которая зависит только от скорости. В этом заключается знаменитый парадокс близнецов — космонавт, улетающий в космос, разгоняющийся до скорости, сравнимой со скоростью света, а затем возвращающийся на Землю, обнаружит, что его близнец, оставшийся на Земле, стал намного старше, чем он сам. Еще раз подчеркнем, что тут весь «фокус» в ускорении, хотя в ответ оно явно не входит. При скорости полета самолета около 400 км/ч этот эффект за 14 ч составит примерно 5 нс. Таким образом, в окончательном сличении разность должна была составить 50 нс — —5 нс=45 нс. Именно эту величину и получили при окончании измерений!

Мы еще вернемся к проблеме влияния гравитационного поля на темп течения времени, когда в § 13 познакомимся с так называемыми черными дырами — объектами с очень сильным гравитационным полем.

§ 9. СОЛНЦЕ ИСКАЖАЕТ ПОРТРЕТ НАШЕЙ МЕТАГАЛАКТИКИ И ЗАДЕРЖИВАЕТ РАДИОЭХО

Таким образом, результаты экспедиции в Собрал и на Принсипи оставляют мало сомнений в том, что луч света отклоняется вблизи Солнца и что отклонение, если приписать его действию гравитационного поля Солнца, по величине соответствует требованиям общей теории относительности Эйнштейна. Однако интерес к данным наблюдениям таков, что в дальнейшем, вероятно, будет признано желательным еще раз провести их во время будущих затмений. Необычайно благоприятные условия затмения 1919 г. уже не повторятся, и придется фотографировать более слабые звезды, которые, вероятно, будут более удалены от Солнца.

Ф. Дайсон, А. Эддингтон, К. Дэвидсон, 1920 г.

Рассмотренные в § 8 два гравитационных эффекта носят, так сказать, скалярный характер. Изменение темпа хода часов не зависит от того, подняты

они строго над головой экспериментатора или смещены в сторону. Важна лишь разность гравитационных потенциалов, и на поверхности равного потенциала (для Земли — на одинаковой высоте) все одинаковые часы идут синхронно. То же справедливо и для красного и голубого смещения частоты фотонов. Если говорить о четырех координатах пространства-времени, то эффекты рас-

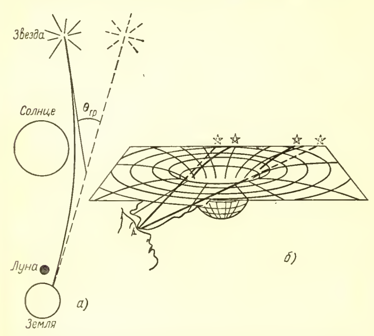


Рис. 16. *а*) Схема опыта по измерению отклонения электромагнитной волны в гравитационном поле Солнца ($\theta_{гр} \approx 1{,}75''$). *б*) Двумерная аналогия, иллюстрирующая влияние кривизны трехмерного пространства на распространение света.

смотренные в § 8, относятся к одной временной координате: гравитационное поле влияет на темп течения времени. В этом параграфе мы рассмотрим другие эффекты ОТО, носящие геометрический характер. Речь пойдет об искажении траекторий лучей света и радиоволн гравитационным полем — другими словами, о влиянии гравитационного поля на пространственные координаты, с помощью которых описываются траектории.

Впервые идея опыта такого рода была предложена самим Эйнштейном еще в 1917 г. Представим себе, что мы

фотографируем звезды, когда лучи света от них проходят вблизи края Солнца (рис. 16). Это можно сделать во время полного солнечного затмения, когда диск Луны для земного наблюдателя полностью закрывает диск Солнца. Если сделать еще одну фотографию того же участка неба (через полгода, когда Солнце будет для земного наблюдателя далеко от этого участка неба), то сравнение двух фотографий позволит измерить возможное изменение углового расстояния между соседними звездами. Луч света (поток фотонов) от звезды отклоняется в гравитационном поле Солнца тем сильнее, чем ближе он проходит к краю Солнца. Из-за этого смещение изображения звезды на фотографии тем больше, чем ближе звезда к диску Солнца. Это простое качественное рассуждение не дает основного, что необходимо для выполнения проверочного опыта,— числа. Можно ли при вычислении, так же как в § 8, рассматривать фотон как шарик массой $m=E/c^2=\hbar\omega/c^2$, летящий со скоростью света? Если воспользоваться ньютоновской теорией гравитации (законом всемирного тяготения), то ответ будет следующим: угловое смещение звезды, луч от которой проходит вблизи края Солнца, должно быть равно 0,87". Если же исходить из ОТО, то результат должен быть вдвое больше. Почему тот же самый «трюк» — замена фотона обыкновенной частицей массы $m=\hbar\omega/c^2$, который мы с успехом применили в предыдущем параграфе, дает неверный результат когда речь идет не об изменении частоты фотонов (как в § 8), а об искривлении траектории фотона? Согласно ньютоновской теории гравитационная сила действует на тела в плоском пространстве-времени, в результате чего тела движутся по искривленным траекториям (например, по гиперболам, параболам или эллипсам).

Но можно, тем не менее, задать такой вопрос: в каком искривленном пространстве-времени траектории тел, предсказываемые ньютоновской теорией, соответствуют четырехмерным геодезическим? Оказывается, что такое четырехмерное пространство является пространственно плоским, т. е. в каждый момент времени трехмерное пространство — евклидово, но время течет по-разному в различных точках трехмерного пространства в зависимости от значения ньютоновского гравитационного потенциала, в полном соответствии с эффектами, рассмотренными в § 8. Что же касается ОТО, то в случае слабого поля (слабого в том смысле, что $\Delta\varphi/c^2 \ll 1$) эта теория предсказывает такое четырехмерное пространство-время,

что в нем не только время течет по-разному в различных точках трехмерного пространства, но и само трехмерное пространство искривлено, т. е. не является точно евклидовым. Поэтому не случайно, что результат любого эксперимента в слабом гравитационном поле, если в этом эксперименте пространственная кривизна по той или иной причине не важна, можно переформулировать на ньютоновском языке. Именно с такими экспериментами мы имели дело в § 8. С другой стороны, ОТО с самого начала включает в себя принцип соответствия, согласно которому в случае очень слабого гравитационного поля и малых скоростей, много меньших, чем скорость света, все предсказания ОТО должны совпадать с предсказаниями ньютоновской теории. Последнее означает, что геодезические медленных частиц согласно ОТО почти «не чувствуют» кривизну трехмерного пространства. Но когда речь идет о геодезических, соответствующих предельно быстрым частицам — фотонам, учет пространственной кривизны становится существенным. Можно сказать, что искривление траектории фотонов слагается из двух эффектов, один из которых связан с изменением хода часов, а другой — с кривизной пространства. Как показывают расчеты, основанные на ОТО, эти эффекты дают равные отклонения, которые, складываясь друг с другом, приводят к множителю два в окончательном результате. Таким образом, разница в численном выражении величины эффекта играет ключевую роль.

Результат вычислений Эйнштейна может быть записан в очень простой форме: угловое смещение положения звезды $\theta_{гр}$ равно

$$\theta_{гр} = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} \frac{R_{\odot}}{R} = \frac{1{,}75''}{\rho}. \qquad (9.1)$$

В этой формуле G — гравитационная постоянная, $M_{\odot}$ и $R_{\odot}$ — масса и радиус Солнца, R — прицельное расстояние, $\rho = R/R_{\odot}$ (см. рис. 16).

Первая проверка этого эффекта была выполнена 29 мая 1919 г. Ф. Дайсоном, А. Эддингтоном и К. Дэвидсоном. Опыт дал вполне однозначный ответ: наблюдаемая величина близка к ожидаемой: 1,75″. Но погрешность измерений составила около 20% величины ожидаемого эффекта. Этого вполне достаточно, чтобы отвергнуть чисто ньютоновский расчет и «склониться» в пользу ОТО. Однако такой точности еще не хватает для надежной проверки ОТО. Дело в том, что после создания ОТО был выд-

вннут целый ряд альтернативных теорий гравитации, которые в своих предсказаниях порой не так сильно отличаются от ОТО, как ньютоновская теория. Точность в 20% не позволяла сделать выбор между этими теориями и ОТО. (Об альтернативных теориях гравитации мы поговорим чуть подробнее в § 15.) Поэтому после первого опыта было предпринято несколько попыток повторить этот эксперимент, сохранив ту же процедуру измерения. К сожалению, особенными успехами экспериментаторы

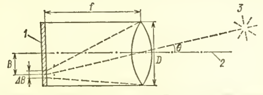


Рис. 17. Дифракционные ограничения в оптическом телескопе: *1* — фотопластинка, *2* — ось телескопа, *3* — звезда.

похвастаться так и не смогли — точность измерений возросла, но не существенно. Причем некоторые опыты просто не удались. Причин неудач было несколько. Часто бывало так, что экспедиция астрономов собиралась в определенное место, где должно было наблюдаться полное солнечное затмение, но именно в этот день и час, когда телескопы и фотопластинки были приготовлены, небо затягивалось облаками или атмосфера была сильно возмущена и изображения получались размытыми. Но есть еще одна причина, не позволившая существенно повысить точность измерений, даже когда небо было чистым, а атмосфера невозмущенной. Эта причина — дифракция света. Явление дифракции света связано с волновой природой электромагнитных волн и проявляется, например, в том, что волна может «огибать» препятствие (экран), «заходить» в область тени (если область тени определять чисто геометрически). Из-за дифракции света размер изображения звезды на фотопластинке телескопа всегда имеет конечные размеры.

На рис. 17 изображена в упрощенном виде процедура определения углового расстояния θ звезды от оси телескопа. Из рисунка видно, что $\theta = B/f$, где f — фокусное расстояние линзы. Размер изображения ΔB из-за дифракции световых волн всегда конечен и равен

$$\Delta B = \lambda \frac{f}{D}, \qquad (9.2)$$

где D — диаметр телескопа, λ — средняя длина волны света, регистрируемая фотопластинкой. Из этого соотношения следует, что

$$\Delta\theta = \Delta B/f \approx \lambda/D. \qquad (9.3)$$

И если $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см, $D = 50$ см, то $\Delta\theta \approx 1 \cdot 10^{-6}$ рад $\approx 0{,}2''$. Согласно простой формуле (9.3) для повышения углового разрешения надо увеличивать D, т. е. использовать телескопы большого диаметра. Но если хорошенько подумать, то можно сообразить, что вовсе не соотношение (9.3) определяет точность измерения угла θ, так как аккуратный экспериментатор может постараться измерить положение центра пятна, ширина которого ΔB. А это можно сделать много точнее: пятно на фотопластинке образовано весьма большим количеством зерен серебра, которые образовались в результате попадания на фотопластинку многих миллионов оптических фотонов. Это, несомненно, правильное соображение. Однако, для того чтобы использовать этот резерв, нужна относительно длительная экспозиция фотопластинки, в течение которой будут усредняться и возмущения положения пятна, вызванные флуктуациями атмосферы. Но, с другой стороны, полное солнечное затмение продолжается недолго. Именно из-за этой совокупности причин во всех опытах по измерению угловых смещений звезд, вызванных гравитационным полем Солнца, астрономам не удалось достичь точности измерений больше 10% от значения ожидаемого эффекта. Так продолжалось вплоть до 1970 г., когда экспериментаторы-радиофизики создали радиоинтерферометры со сверхдлинной базой. За 10 лет, прошедших после этого, т. е. к концу 70-х годов, во многих лабораториях мира, имеющих такие радиоинтерферометры, эффект отклонения электромагнитных волн в гравитационном поле Солнца измерялся неоднократно. Точность измерений по мере совершенствования аппаратуры росла и к концу прошлого десятилетия достигла $0{,}01''$. В пределах этой погрешности (т. е. около 0,5% от $1{,}75''$) предсказание ОТО подтвердилось.

Рассмотрим несколько подробнее радиоинтерферометрическую методику измерений. На рис. 18 изображена принципиальная схема радиоинтерферометра с большой (но пока не сверхдлинной) базой. Он состоит из двух параболических антенн, оси которых примерно параллельны. От двух антенн в одно место сходятся два СВЧ-кабеля. Сигнал, пришедший от яркого радиоисточника,

принимается приемником синхронно, т. е. усиливаются только те электромагнитные колебания, которые «вошли» в антенны одновременно (радиофизики говорят — в фазе). Дифракция электромагнитных волн СВЧ-диапазона играет в таком приемнике ту же роль, что и в оптическом телескопе. (Дифракция — это общее для всех волновых процессов явление.) Именно из-за дифракции ширина угловой диаграммы направленности $\Delta\theta$ такого радио-

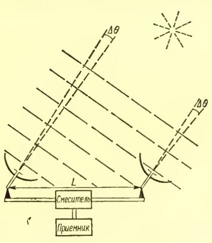


Рис. 18. Принципиальная схема радиоинтерферометра с базой L.

интерферометра подчиняется той же простой формуле, которая была приведена выше (формула (9.3)):

$$\Delta\theta \approx \lambda/L, \qquad (9.4)$$

где λ — длина волны, на которую настроен приемник, L — расстояние между антеннами (база). В первых опытах L было около 3 км. Для длины волны $\lambda=3$ см значение $\Delta\theta \approx 1\cdot10^{-5}$ рад$=2''$. В таких измерениях, так же как и в случае с пятнышком от звезды на фотопластинке, можно различать малые доли от $\Delta\theta$. Именно поэтому уже в первых измерениях эффекта ОТО на таком радиоинтерферометре в 1971 г. была достигнута точность около 6% от величины эффекта, что заметно лучше, чем в оптических измерениях. Здесь надо отметить, что ярких радиоисточников на небе относительно много. Использовались во время измерений «затменные» источники (т. е. те, которые «заходят» за Солнце). Главная причина су-

щественного повышения точности радиоизмерения состоит в том, что для радиоволн СВЧ-диапазона атмосфера намного прозрачнее, чем для оптических волн и, следовательно, возмущение фронта электромагнитной волны намного слабее. Второе преимущество состоит в том, что измерения можно производить, не дожидаясь затмения,— радиотелескоп «слеп» в оптическом диапазоне, т. е. измерения можно производить всякий раз, когда яркий радиоисточник приближается к диску Солнца.

Но это был лишь первый этап работы. Вначале, как мы уже сказали, использовались радиоинтерферометры с длинной, но не сверхдлинной базой. В странах, где научные исследования достигли достаточно высокого уровня, как правило есть несколько радиотелескопов. Эти радиотелескопы обычно удалены достаточно далеко друг от друга — на сотни километров. Ясно, что, увеличивая базу L радиоинтерферометра с 3 км до, скажем, 300 км, можно сузить диаграмму направленности на два порядка. Но прокладка СВЧ-кабеля на такое расстояние — весьма дорогостоящее дело. Такой длины кабель радиофизики предложили заменить двумя стандартами частоты и двумя хорошими магнитофонами. Идея этой замены необычайно проста. Для того чтобы два радиотелескопа, удаленные друг от друга на сотни километров, работали как единый радиоинтерферометр, необходимо «принимать» радиосигналы от одного источника синхронно, т. е. регистрировать только те электромагнитные колебания, которые приходят в фазе. Но радиосигнал (обычно после преобразования частоты с помощью гетеродина) можно записать на магнитной пленке. Записи на двух магнитофонах, подключенных к «выходам» двух радиотелескопов, можно сделать синхронными, если на той же магнитной ленте с помощью двух высокостабильных генераторов сделать метки времени. Затем две магнитные ленты (пленки) с такими записями и метками времени остается лишь привезти в одну лабораторию и в ней произвести «считывание» только тех записанных радиосигналов, которые «пришли» на антенны в одной фазе. В этом состоит основная идея радиоинтерферометров со сверхдлинными базами. С их помощью в 1978 г. удалось уменьшить погрешность в измерении отклонения электромагнитной волны гравитационным полем Солнца до 0,5% (100% — значение самого эффекта), и так же, как и в предшествующих опытах, в пределах погрешности измерений никаких отклонений от предсказания ОТО обнаружено не было.

Читатель может спросить, почему переход от радиоинтерферометра с длинной базой (3 км) к радиоинтерферометру со сверхдлинной базой (больше 300 км) привел к уменьшению погрешности измерений только на один порядок (от 6 до 0,5%), а не на два. Причина состоит в том, что при измерениях угловых смещений радиоисточников на уровне сотых долей угловой секунды можно пренебречь атмосферой Земли, но, к сожалению, прихо-

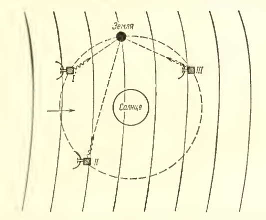


Рис. 19. Схема космического радиоинтерферометра Н. С. Кардашева: *I*—*III*— космические радиотелескопы. Тонкими сплошными линиями условно изображены положения фронта электромагнитной волны от удаленного источника.

дится вносить значительную поправку на «атмосферу» Солнца — солнечную корону.

Радиоинтерферометры со сверхдлинной базой, конечно, используются не только для измерения указанного эффекта ОТО. С их помощью, например, удалось снять карты рельефа планет Марса и Венеры. А это было необычайно важно для выбора места посадки спускаемых аппаратов.

Остановимся кратко еще на одном весьма привлекательном проекте опыта, предложенного советским астрофизиком Н. С. Кардашевым. Представим себе, что в нашем распоряжении имеются три спутника, выведенные на гелиоцентрическую орбиту (рис. 19). Пусть на каждом из этих спутников есть радиотелескоп и все эти радиотелескопы ориентированы в одном направлении. Если производить запись радиосигналов от весьма удаленного источника, пришедших на эти спутники, так же как это

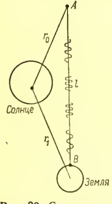
делается в радиоинтерферометре со сверхдлиииой базой, а затем «направлять» (с помощью других аитенн) эту запись иа Землю для совместиой обработки и выделеиия радиоволиы, пришедшей сиихроиио (когереитио), то можно таким образом реализовать радиоинтерферометр со сверхсверхдлииной базой. Действительно, роль базы будет играть диаметр земиой орбиты ($3 \cdot 10^{13}$ см). Если средияя длииа волиы приемииков иа спутииках около 3 см, то угловое разрешеиие будет примерно $2 \cdot 10^{-13}$ рад $\approx 2 \cdot 10^{-8}$ угл. с! С помощью такого радиоинтерферометра можно будет различать сравиительио малые детали даже на краю нашей Метагалактики, т. е. той части Вселеииой, которая, в прииципе, доступна нашим сегодияшним иаблюдениям (см. § 14). Благодаря этому окажутся возможиыми иекоторые принципиально иовые «космологические» опыты.

Итак, мы рассмотрели эффект отклонеиия луча света или, что то же самое, поворот фронта электромагнитиой волиы при распространении в статическом, т. е. иеизменном во времеии, гравитациоином поле Солица. Фроит волиы поворачивается на определеииый угол, и земиому наблюдателю кажется, что источиик излучеиия смещается. Это угловое смещеиие — иаибольшее для той части фроита, которая ближе всего к краю Солнца. С удалением от Солица угловое смещение убывает. В обычной оптике хорошо известио, что призмы и линзы из оптически плотных материалов (стекла, кварца, прозрачиых мииералов) также «разворачивают» фронт электромагнитиой волиы. Если пользоваться такой аиалогией, можио сказать, что статическое гравитациоиное поле создает что-то вроде дополиительиого показателя преломлеиия для электромагиитных волн (оио является более плотиой оптической средой, чем «чистый» вакуум, т. е. вакуум без близкого присутствия гравитациоииых масс). Этот дополиительный показатель преломлеиия Δn примерно равен отиошеиию $\Delta\varphi/c^2$ ($\Delta\varphi = GM/r$ — гравитациоиный потенциал, c — скорость распространеиия электромагиитиых волн). Такая аналогия, возможио, послужила толчком для того, чтобы предложить, а затем и осуществить другой опыт по проверке ОТО. Идея этого опыта проста. Если статическое гравитациоиное поле создает для электромагиитиых волн дополнительный показатель преломлеиия, то оио должио задерживать импульсы электромагиитиых волн, так как в плотной среде скорость распространеиия электромагнитных волн меньше, чем в «чистом» вакууме.

Представим себе, что нмпульс электромагннтных волн распространяется вблнзи днска Солнца (рнс. 20) от нсточннка в точке A до приемннка в точке B. Расчет, основанный на ОТО, приводнт к следующей простой формуле: дополнительная задержка во временн Δt равна

$$\Delta t = \frac{GM_{\odot}}{c^3} \ln \frac{r_0 + r_1 + l}{r_0 + r_1 - l}, \qquad (9.5)$$

где c — скорость света, а смысл r_0, r_1 н l ясен нз рнс. 20. Пусть нз точки B, расположенной на Земле, нспускается радиоимпульс, который, отразнвшнсь от точки A, расположенной на Марсе, возвращается в точку B. Если Марс находится в так называемом положеннн дальнего соединення (прнмерно так, как это нзображено на рис. 20), то $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-4}$ с для нмпульса, распространяющегося от B к A н обратно. Уместно отметнть, что такая задержка в $2 \cdot 10^{-4}$ с соответствует эффектнвному удлнненню путн l на 60 км. Еслн вспомннть, что погрешность нзмерения расстояний между наземнымн антеннамн и антеннамн на спутннках около 1 м (см. § 6), то станет очевидным, что этот эффект можно нзмернть с весьма большой точностью. Измерення эффекта задержкн проnзводнлись много раз начнная с 1967 г. Последнее нзмеренне было завершено в 1981 г. Наибольшей точности удалось достичь ученым нз Массачусетсского технологнческого ннстнтута (США). Согласно нх нзмеренням велнчнна задержки совпадает с предсказаннем ОТО с точностью до погрешностн нзмерений, которая составляет 0,2% значения эффекта. Это нанвысшая точность, которой удалось достичь прн проверке ОТО в гравнтационном поле Солнца. Для того чтобы читатель мог представнть себе, как реально пронсходнлн этн нзмерення, нужно сразу сказать, что ннкакнх неподвнжных платформ (опор) A и B не было. На самом деле есть СВЧ-передатчик нмпульсов, связанный с антенной раднотелескопа на Земле, н спутннк, вращающийся вокруг Марса, а на



Рнс. 20. Схема опыта по измеренню задержкн нмпульса электромагнитного излучення в гравитацнонном поле Солнца.

спутнике — ретранслятор с усилителем и небольшой СВЧ-антенной, направленной на Землю. И все эти тела движутся вокруг Солнца, а спутник — еще и вокруг Марса. Наземный наблюдатель может измерять лишь полное время движения электромагнитного импульса «туда и обратно», т. е. измерять l. Однако у наблюдателя есть возможность измерять эту величину в разные интервалы времени и в процессе движения Земли, Марса и спутника

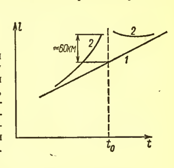


Рис. 21. Зависимость от времени измеряемого расстояния l между искусственным спутником Марса и Землей: 1 — изменение во времени, рассчитанное по ньютоновской теории; 2 — реально измеряемое расстояние, t_0 — момент дальнего соединения, когда Земля, Солнце и Марс находятся на одной прямой.

предвычислять заранее значение l в последующие интервалы. Эти предвычисления можно делать, либо используя только закон всемирного тяготения Ньютона, либо используя ОТО. На рис. 21 сплошными кривыми показаны результаты предвычислений величины l вблизи положения дальнего соединения Марса, причем предсказания ОТО хорошо согласуются с результатами измерений l по времени движения электромагнитного импульса.

Заканчивая это краткое описание опытов, которые дали такое хорошее подтверждение теории, нужно отметить, что в описании было опущено много деталей. Так, например, в процессе измерений нужно было вводить поправку на показатель преломления для электромагнитных волн в плазме солнечной короны (чтобы это сделать, нужно было использовать две СВЧ-частоты, так как плазма имеет сильную зависимость показателя преломления от частоты); для вычислений величины l нужно было учитывать возмущающее гравитационное воздействие на траектории Земли и Марса нескольких ближайших планет и т. п.

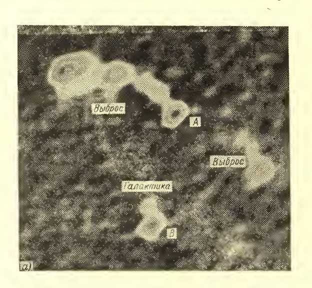
Подводя итог описанию весьма точно измеренных релятивистских гравитационных эффектов, можно сказать, что сейчас для точного прогнозирования полетов в Солнечной системе ОТО стала почти «инженерной» наукой о навигационных поправках к теории Ньютона.

Итак, мы с вами узнали, что Солнце отклоняет электромагнитные волны. Теория гравитации предсказывает, что любое гравитирующее тело должно отклонять лучи света,— следовательно, любое гравитирующее тело должно действовать наподобие оптической линзы, формируя изображение космических объектов, если подобного сорта линза расположена недалеко от луча зрения, соединяющего некоторый космический объект с наблюдателем. До 1979 г. это оставалось лишь теоретическим предсказанием. В 1979 г., через несколько недель после 100-летнего юбилея Эйнштейна, был открыт удивительный объект: двойной квазар (Q 0957+561). Изображение квазара, полученное в различных диапазонах электромагнитного излучения, состояло из двух отдельных, почти точечных изображений, отделенных друг от друга угловым расстоянием 6′ дуги. Самое удивительное заключалось в том, что хотя интенсивности излучения от двух отдельных компонент изображения (назовем их A и B, рис. 22) были различны, спектральные особенности каждой из компонент A и B были удивительно похожи.

Впоследствии поблизости была обнаружена большая эллиптическая галактика, расположенная на небе чуть северо-восточнее компоненты B (см. рис. 22). Многие ученые считают, что эта эллиптическая галактика и является гравитационной линзой, а две компоненты изображения квазара A и B суть два изображения одного и того же объекта, который мы видим с Земли «сквозь» гравитационную линзу. После этого было обнаружено еще три других объекта, подозреваемые в том, что, наблюдая их, мы имеем дело с гравитационными линзами. Основное отличие гравитационной линзы от обычных собирательных линз состоит в том, что, как видно из формулы (9.1), угол отклонения тем больше, чем ближе к центру линзы проходит луч света. Из-за специфической зависимости θ от r у гравитационных линз нет фокусного расстояния и они не дают точечного изображения для точечного предмета.

Как показывают расчеты, протяженное гравитирующее тело в качестве гравитационной линзы должно давать тройное изображение. Эллиптическая галактика, расположенная на небе вблизи компоненты B в двойном квазаре, является, безусловно, протяженным телом. Поэтому немного озадачивало отсутствие третьего компонента. Но, во-первых, он может быть значительно слабее по интенсивности, чем два других, а, во-вторых, его

изображение может «затмеваться» излучением самой эллиптической галактики. Были проведены расчеты прохождения света через прозрачные протяженные объекты (типа галактик и ядер галактик, состоящих из отдельных звезд) при различной зависимости плотности от расстоя-



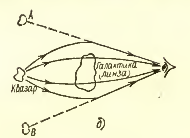


Рис. 22. Двойной квазар Q 0957+561: *а*) изображение в радиодиапазоне, *б*) схема «действия» гравитационной линзы.

ния до центра. Оказалось, что изображения могут быть еще более сложными и состоять из еще большего числа компонент.

Некоторые ученые высказываются скептически по поводу открытия гравитационных линз. Но судья, как всегда, один — опыт, т. е. дальнейшие наблюдения пока-

жут, много ли во Вселенной гравитационных линз и какую роль они играют в «искажении портрета Метагалактики».

§ 10. НАСКОЛЬКО БЫЛ НЕПРАВ КЕПЛЕР

Если же я выступил в защиту своей собственной теории, то сделал это в надежде на то, что она истинна и исполнена серьезного смысла, в силу чего я решительно не намерен отказаться от нее до тех пор, пока кто-нибудь, превосходящий меня своей ученостью, не даст безупречного доказательства ее ошибочности.

И. Кеплер «Разговор со звездным вестником», 1610 г.

Иоганн Кеплер, обработав огромную массу данных о видимых положениях планет на небе, добытых многолетними наблюдениями своего учителя Тихо Браге, пришел к поразительным для того времени выводам о движении планет. Кеплер сформулировал три фундаментальных закона, носящих теперь его имя.

Первый закон Кеплера гласит: орбита каждой планеты представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Второй закон Кеплера звучит так: прямая, соединяющая Солнце и какую-либо планету, за равные промежутки времени описывает одинаковую площадь.

И, наконец, третий закон Кеплера дает связь между периодами обращения планет и их расстояниями до Солнца: квадраты периодов обращения двух любых планет вокруг Солнца T_1 и T_2 относятся как кубы R_1 и R_2 больших полуосей эллипсов, по которым они движутся:

$$T_1^2/T_2^2 = R_1^3/R_2^3. \qquad (10.1)$$

Впоследствии Ньютон вывел все три закона Кеплера, исходя из второго закона динамики и закона всемирного тяготения (см. § 2). Ньютон доказал, что эмпирические законы Кеплера однозначно следуют из обратной пропорциональности гравитационной силы квадрату расстояния между двумя притягивающимися массами. При любой другой зависимости силы от расстояния законы Кеплера не выполнялись бы. По мере того, как возрастала точность астрономических наблюдений за движением планет, астрономы обнаруживали отклонения от законов Кеплера, вызванные возмущениями орбиты той или иной планеты, которые объяснялись гравитационным притяжением со стороны остальных планет Солнечной системы. Наряду с количественными поправками ко второму

и третьему законам Кеплера, наблюдался интереснейший качественный эффект, связанный с нарушением первого закона Кеплера: любые возмущающие силы должны приводить к тому, что орбита планеты представляет собой не чистый эллипс, а эллипс, который медленно поворачивается, оставаясь в одной и той же плоскости. В результате перигелий планет, т. е. ближайшая к Солнцу точка орбиты, с течением времени смещается на некоторый угол (рис. 23). Наибольшее смещение перигелия наблюдалось у ближайшей к Солнцу планеты, т. е. у Меркурия. Было обнаружено, что каждые 100 лет перигелий Меркурия смещается на угол 532″, т. е. примерно на 9′ за 100 лет. Уже в середине XIX века астрономы научились определять движения планет с такой высокой точностью, что смогли провести точнейший учет влияния всех других планет на орбиту Меркурия. Оказалось, что, применяя закон всемирного тяготения Ньютона, удается объяснить лишь часть наблюдаемого смещения Меркурия. Другими словами, ньютоновская теория предсказывала смещение перигелия Меркурия меньшее, чем наблюдаемое. Необъясненным оставалось смещение, равное 43″ за столетие, обнаруженное в 1859 г. астрономом Леверье. Чтобы объяснить такую аномалию, пытались изменить закон всемирного тяготения, но отказались от подобных попыток, поскольку при этом возникали трудности в объяснении движения других планет. Были предприняты поиски гипотетической планеты (ей даже дали имя Вулкан) между Солнцем и Меркурием, но тоже безуспешно.

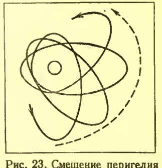


Рис. 23. Смещение перигелия Меркурия.

Когда Эйнштейн в 1915 г. получил свои знаменитые уравнения для гравитационного поля, он первым делом рассчитал с их помощью, как искривлено пространство-время вблизи Солнца. Затем, зная геометрию пространства-времени, он определил форму геодезических, т. е. кратчайших мировых линий, по которым движутся планеты в этом искривленном пространстве-времени.

Поскольку пространство-время вблизи Солнца искривлено слабо, задачу о движении планет можно было

сформулировать и на ньютоновском языке: планета движется в плоском пространстве-времени, но на нее со стороны Солнца действует сила притяжения, немного отличающаяся от ньютоновской силы, предсказываемой законом всемирного тяготения.

Согласно теории Эйнштейна любая планета даже без учета возмущений, вносимых остальными планетами, должна описывать в своем движении медленно поворачивающийся эллипс. За один оборот по орбите смещение перигелия составляет

$$\Delta\varphi = \frac{6\pi G M_{\odot}}{c^2 a (1 - e^2)} , \qquad (10.2)$$

где a — большая полуось эллипса, а e — его эксцентриситет.

Для всех планет, начиная с Венеры и дальше от Солнца, такие релятивистские смещения перигелиев слишком малы, чтобы их можно было в то время заметить. Но вот для Меркурия релятивистское смещение перигелия составило как раз 43″ за столетие! Такое поразительное совпадение явилось подлинным триумфом ОТО. Физики впервые осознали, что родилась теория, более точная, чем закон всемирного тяготения Ньютона, который с фантастической точностью описывает движение планет, астероидов и комет и даже позволил в свое время найти, как говорится, на кончике пера, т. е. теоретически, планету Нептун.

Начиная с 1966 г. на помощь традиционным оптическим методам наблюдения за движением планет пришла радиолокация планет, которая позволила существенно повысить точность определения параметров орбит. В частности, точность измерения смещения перигелия Меркурия радиолокационными методами к середине 70-х годов достигла 0,5% от измеренного релятивистского эффекта. ОТО согласовывалась с наблюдениями с такой высокой точностью.

В 60-х годах была выдвинута одна из наиболее жизнеспособных альтернативных теорий гравитации, так называемая скалярно-тензорная теория гравитации (см. § 15). Эта теория предсказывает смещение перигелия Меркурия, заметно меньшее, чем в ОТО. Но создатели этой теории не собирались сдаваться, выдвинув гипотезу, что не все 43″ в смещении перигелия Меркурия объясняются искривлением пространства-времени, а только часть,

примерно 39″. Остающиеся 4″ следует отнести к искажению орбиты Меркурия, вызванному сплюснутостью Солнца. Дикки с сотрудниками предпринял в 1974 г. попытку измерить сплюснутость Солнца и получил результат, якобы подтверждающий его теорию и тем самым отвергающий ОТО. Однако другая группа исследователей (Хилл и другие) никакой сплюснутости Солнца не обнаружила Поскольку подобного сорта измерения крайне трудны (ожидаемая сплюснутость очень мала — экваториальное сечение Солнца является эллипсом с разностью полуосей всего лишь 35 км при среднем радиусе Солнца 700000 км), причины расхождения этих результатов до сих пор не установлены. Хотя следует признать, что некоторая неопределенность в этом вопросе еще остается, но явного повода для сомнений в справедливости ОТО пока нет. В наш космический век, когда космические корабли уже бороздят просторы Солнечной системы, появилась реальная возможность устранить эту неопределенность в проблеме смещения перигелия Меркурия. Дело в том, что, пользуясь радиолокацией искусственных спутников Венеры и Марса, снабженных ретрансляторами радиоволн, можно, в принципе, в ближайшем будущем определить релятивистские смещения перигелиев и этих планет, а также Земли. Поскольку смещения перигелиев, вызванные кривизной пространства-времени и сплюснутостью Солнца, по-разному зависят от расстояния между планетой и Солнцем, то по измерениям смещений перигелиев нескольких планет можно будет точно определить вклад того и другого эффекта в отдельности, а заодно независимо измерить сплюснутость Солнца.

На этом можно было бы закончить рассказ о смещении перигелиев планет и перейти к другим экспериментам в Солнечной системе, но летом 1974 г. Рассел Хальс и Джозеф Тейлор обнаружили в далеком космосе совершенно удивительный объект, которому было суждено стать своеобразной релятивистской лабораторией, буквально подаренной релятивистам щедрой природой.

Речь идет об открытии пульсара в двойной системе. Прежде всего, что такое пульсар.

В 1967 г. английские радиоастрономы, работающие под руководством Хьюиша в Кембридже, обнаружили приходящие из космоса регулярно повторяющиеся радиоимпульсы, следовавшие один за другим с интервалом меньше 1 с. Необычайная точность, с которой поддержи-

валась регулярность прихода импульсов, навела было ученых на мысль, что наконец-то земляне обнаружили сигналы какой-то внеземной цивилизации. Этот объект назвали пульсаром. Менее чем за полгода было обнаружено еще три пульсара. Сегодня их число измеряется сотнями.

Очень скоро стало ясно, что пульсары — это не что иное, как нейтронные звезды. Как показали еще в 1934 г. Бааде и Цвикки, при гравитационном сжатии достаточно массивной звезды, исчерпавшей запасы своего ядерного горючего, происходит «вдавливание» электронов в протоны с образованием нейтронов. Нейтроны под действием гравитационных сил сжимаются в очень плотный объект — нейтронную звезду, которая представляет собой своеобразное атомное ядро, «крайне переобогащенное» нейтронами, размеры которого порядка 10 км, а масса — порядка массы Солнца. Один кубический сантиметр вещества нейтронной звезды «весит» больше 100 млн. тонн!

Почему нейтронные звезды проявляются в виде пульсаров? Это происходит благодаря тому, что сжатые до таких малых размеров нейтронные звезды, с одной стороны, должны очень быстро вращаться, а, с другой стороны, могут обладать очень сильным магнитным полем. Первое из этих свойств следует из закона сохранения момента количества движения и проявляется, например, в том, что фигурист, вращающийся с раскинутыми в сторону руками, начнет вращаться намного быстрее после того, как прижмет руки к груди. Наличие же сильного магнитного поля объясняется законом сохранения потока магнитного поля, т. е. законом сохранения числа магнитных силовых линий: то же самое количество силовых линий, которое до сжатия пересекало экваториальное сечение звезды, теперь пересекает существенно меньшее по площади экваториальное сечение сжавшейся нейтронной звезды. В результате напряженность магнитного поля, представленная густотой силовых линий, должна необычайно возрасти.

Если к этому добавить, что на поверхности нейтронной звезды имеются заряженные частицы, которые должны ускоряться электрическим полем, то мы в самых общих чертах можем представить себе нейтронную звезду, воспользовавшись так называемой моделью наклонного ротатора, изображенной на рис. 24. Ускоренные электрическим полем заряженные частицы, благодаря нали-

чию силы Лоренца, движутся, как бы навиваясь на магнитные силовые линии и излучая при этом радиоволны. Если направление магнитного поля не совпадает с направлением вращения (отсюда и название наклонный ротатор), то возникает «чиркающий» по Вселенной луч радиопрожектора, воспринимаемый нами на Земле как радиоимпульс каждый раз, как этот луч попадает на земной радиотелескоп. Таким образом, интервал времени между приходом соседних радиоимпульсов равен периоду вращения нейтронной звезды вокруг собственной

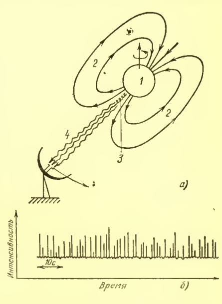


Рис. 24. Модель пульсара (*а*): *1* — вращающаяся нейтронная звезда, *2* — силовые линии магнитного поля, *3* — пучок заряженных релятивистских частиц, *4* — направленный радиолуч, испускаемый релятивистскими частицами. Из-за того, что ось симметрии магнитного поля не совпадает с осью вращения (наклонный ротатор), радиолуч «чиркает» по Вселенной, что воспринимается удаленным наблюдателем как строго периодическая последовательность радиоимпульсов (*б*).

оси. Любой другой объект, будь то обычная звезда или белый карлик *), развалился бы на части при таких чудовищных угловых скоростях вращения. Недавно был обнаружен рекордно «быстрый» пульсар — время между приходом соседних импульсов составляет для него всего лишь $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ с!

Сегодня не вызывает сомнений, что пульсары связаны со вспышками сверхновых. Образование нейтронных звезд сопровождается бурным взрывом звезды, когда ее

*) Белый карлик — один из конечных продуктов звездной эволюции, см.: *Блинников С. И.* Белые карлики.— М.: Знание, 1977.

светимость может сравниваться со светимостью целой галактики, насчитывающей порядка 100 млрд. звезд. Яркое тому подтверждение — пульсар в Крабовидной туманности, которая, как было надежно установлено, является остатком вспышки сверхновой, произошедшей в 1054 г. Это поразительное явление, когда на небе вспыхнула звезда, столь яркая, что ее можно было наблюдать невооруженным глазом даже днем, описано в древних китайских летописях.

Вернемся к пульсару в двойной системе, получившему название PSR 1913+16. Это название указывает на то, что двойной пульсар имеет следующие координаты на небесной сфере: прямое восхождение 19 ч 13 мин, склонение $+16^\circ$. Точка с такими координатами расположена в созвездии Орла.

Мы уже сказали, что этот двойной пульсар — уникальная лаборатория в далеком космосе. Это связано с тем, что мы имеем дело с «тесной» двойной системой, да к тому же массы компонентов сравнимы друг с другом, поэтому все релятивистские эффекты здесь существенно заметнее, чем в Солнечной системе. Достаточно сказать, что орбитальные скорости в PSR 1913+16 около 400 км/с, а расстояния между компонентами сравнимы с радиусом Солнца, тогда как самая ближайшая к Солнцу планета Меркурий удалена от Солнца на расстояние 65 радиусов Солнца и имеет орбитальную скорость всего лишь 60 км/с. Но что наиболее важно, пульсар в тесной двойной системе — это прежде всего часы на орбите; стабильность частоты, с которой пульсар посылает импульсы, позволяет с беспрецедентной точностью по вариациям времени прихода импульсов к наблюдателю судить о параметрах орбиты и, следовательно, о тех вариациях этих параметров, которые связаны с релятивистскими эффектами. В обычных двойных системах в качестве часов служат атомы, и параметры орбиты определяются по доплеровскому смещению спектральных линий, соответствующих атомным переходам. Пульсар — это часы, несоизмеримо более точные, и все методы определения параметров орбит по смещению спектральной линии применимы и к пульсару в двойной системе. Мы вправе назвать систему PSR 1913+16 спектрально двойной. Необходимо подчеркнуть, что по эффекту Доплера определяется так называемая лучевая скорость, т. е. проекция скорости на луч зрения. Максимальная лучевая скорость приближения пульсара превышает 300 км/с, а максимальная лу-

чевая скорость удаления составляет всего лишь 75 км/с (рис. 25). Из этого сразу же можно было сделать вывод, что пульсар в двойной системе движется по довольно вытянутой эллиптической орбите. Если орбита эллиптическая, то мы вправе ожидать эффект смещения периастра*), аналогичный эффекту смещения перигелия Меркурия. Предварительные оценки, основанные на значениях параметров орбиты, полученных из наблюдений PSR 1913+16, показали, что смещение периастра долж-

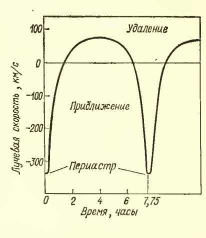


Рис. 25. Вариации лучевой скорости пульсара в двойной системе. Лучевая скорость (т. е. проекция скорости на луч зрения) определяется по доплеровскому сдвигу частоты прихода радиоимпульсов. Отрицательные скорости соответствуют движению пульсара по направлению к Земле. Видно, что отрицательные скорости сильно превосходят по абсолютной величине положительные скорости, соответствующие движению пульсара от Земли. Это говорит о сильной вытянутости орбиты пульсара в двойной системе.

но составить примерно 4° в год. (Сравните 43″ за столетие для Меркурия.) Смещение периастра, как следует из ОТО, зависит от масс компонентов, которые из наблюдений лучевых скоростей и времени задержки сигналов нельзя определить независимо. Поэтому, измерив непосредственно смещение периастра, которое оказалось равным 4,22±0,04° в год, ученые вместо того, чтобы проверять ОТО, решили воспользоваться измеренной величиной релятивистского эффекта, чтобы с высокой точностью определить с его помощью массу самого пульсара. Определение же массы без привлечения этого релятивистского эффекта, как это делается при анализе обычных спектральных двойных, возможно лишь в том случае, когда видны оба компонента и в обоих имеются спектральные линии, по которым можно определить лучевые скорости двух компонентов в отдельности.

*) Периастр — это та точка орбиты, когда пульсар находится в наименьшем удалении от своего невидимого компаньона.

Таким образом, в случае PSR 1913+16 общая теория относительности внесла свой уникальный вклад в конкретные, удивительно точные астрофизические измерения. Масса одного из компонентов двойной системы, пульсара, когда второй компонент является невидимым, может быть измерена только с привлечением ОТО!

Мы не прощаемся с двойным пульсаром, мы вернемся к нему, когда речь пойдет о гравитационных волнах в § 12.

§ 11. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВИХРИ

> Эти эксперименты особенно важны по той причине, что они позволяют непосредственно измерить «увлечение инерциальных систем отсчета» моментом импульса Земли.
>
> *Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. Уилер* «Гравитация» (М.; Мир, 1977, т. 3. с. 370)

В § 5 отмечалось, что когда мы переходим от уравнения, описывающего закон всемирного тяготения Ньютона, к уравнениям Эйнштейна, то тем самым мы переходим от гравистатики к гравидинамике. Однако все описанные до сих пор эксперименты — изменение частоты света, запаздывание радиосигналов, искривление гравитирующим телом лучей света — ограничивались лишь теми новыми предсказаниями ОТО, которые она вносит именно в гравистатику. В § 10 мы смогли даже сформулировать задачу таким образом, что ОТО приводит в этом случае слабого поля лишь к небольшому изменению ньютоновской силы, и на опыте необходимо заметить это изменение и количественно сравнить его с предсказанием теории.

В этом параграфе мы впервые обращаемся к собственно гравидинамическим предсказаниям ОТО. Для этого нам прежде всего необходимо отказаться от предположения, что рассматриваемые нами гравитирующие тела неподвижны. Как показывает анализ уравнений Эйнштейна, в ОТО гравитационное поле движущихся тел качественным образом отличается от гравитационного поля покоящихся тел. Возникает своеобразная составляющая гравитационного поля, которая во многих отношениях аналогична магнитному полю в электродинамике.

Рассмотрим гравитирующее вращающееся тело — например, Землю. Вокруг такого тела наряду с обычным статическим гравитационным полем возникает еще дополнительное гравитационное поле, которое мы назовем, следуя указанной аналогии, гравимагнитным. Это

поле проявляется в том, что все тела, движущиеся относительно гравитирующего вращающегося тела, испытывают действие дополнительной силы, которая зависит не только от того, где данное пробное тело находится, но и от величины и направления его скорости.

Проследим аналогию с электродинамикой чуть подробнее. Пусть мы имеем заряженный, вращающийся шар. Тогда, кроме электростатического кулоновского поля $\boldsymbol{E}$, вокруг шара создается еще и магнитное поле с индукцией $\boldsymbol{B}$, силовые линии которого изображены на рис. 26.

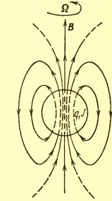


Рис. 26. Силовые линии магнитного поля вращающегося заряженного шара.

Величина B пропорциональна угловой скорости вращения заряженного шара. Если в таком электромагнитном поле движется пробный заряд q, имеющий относительно шара скорость $\boldsymbol{v}$, то сила, которую он испытывает в данном поле, окажется равной, как показал Лоренц,

$$\boldsymbol{F} = q\left(\boldsymbol{E} + [\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}]\right), \qquad (11.1)$$

где квадратными скобками обозначено векторное произведение векторов $\boldsymbol{v}$ и $\boldsymbol{B}$. Свойства векторного произведения отражают тот факт, что по модулю дополнительная сила Лоренца

$$\boldsymbol{F}_{\text{Л}} = q\,[\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}] \qquad (11.2)$$

пропорциональна модулю скорости $|\boldsymbol{v}|$, модулю индукции магнитного поля $|\boldsymbol{B}|$ и синусу угла между векторами $\boldsymbol{v}$ и $\boldsymbol{B}$, а направление вектора $\boldsymbol{F}_{\text{Л}}$ перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы $\boldsymbol{v}$ и $\boldsymbol{B}$.

Связь между векторами $\boldsymbol{F}_{\text{Л}}$, $\boldsymbol{v}$ и $\boldsymbol{B}$, даваемая векторным равенством (11.2), очень напоминает формулу для так называемой силы Кориолиса, которая является инерциальной, «фиктивной» (кажущейся) силой, действующей во вращающихся неинерциальных системах отсчета на любое движущееся относительно этой системы отсчета тело:

$$\boldsymbol{F}_{\text{K}} = 2m\,[\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{\Omega}], \qquad (11.3)$$

где Ω — угловая скорость вращения неинерциальной системы отсчета. (Подробнее о силе Кориолиса см. «Квант» № 10, 1983 г.)

В силу принципа эквивалентности невозможно отличить ускоренную систему отсчета от инерциальной системы отсчета в постоянном гравитационном поле. Естественно, возникает вопрос: какому гравитационному полю в этом смысле соответствует неинерциальная система отсчета, ускорение которой связано с ее вращением? Ответ: такое гравитационное поле создается вращающимся гравитирующим телом. Согласно ОТО любое вращающееся массивное, а значит, и гравитирующее, тело как бы вовлекает в свое вращение все окружающее его пространство-время. Это означает, что локально-инерциальные системы отсчета, те самые, в которых все локальные физические процессы протекают так же, как и в отсутствие гравитационного поля, должны вращаться относительно далеких звезд, т. е. относительно удаленных локально-инерциальных систем отсчета, которые почти не испытывают увлечения из-за того, что гравитационное поле быстро убывает с расстоянием. Такой эффект увлечения инерциальных систем отсчета называется эффектом Лензе — Тирринга. Еще раз подчеркнем, что локально, в точке, этот эффект не отличим от возникновения обычной силы Кориолиса. Но направление и величина угловой скорости увлечения инерциальных систем отсчета (обозначим ее через $\boldsymbol{\Omega}_{\text{ЛТ}}$) уже не являются постоянными, а зависят от координат, точнее, от расстояния r до гравитирующего тела и от азимутального угла θ того места, в котором мы хотим наблюдать эффект Лензе — Тирринга (рис. 27):

$$\boldsymbol{\Omega}_{\text{ЛТ}}(r,\ \theta)=\frac{G}{c^2r^3}\left(\boldsymbol{J}-\frac{3\boldsymbol{r}(\boldsymbol{rJ})}{r^2}\right), \qquad (11.4)$$

где $\boldsymbol{J}$ — угловой момент вращающегося гравитирующего тела, а азимутальный угол θ входит в скалярное произведение векторов $\boldsymbol{r}$ и $\boldsymbol{J}$: $(\boldsymbol{rJ})=rJ\cos\theta$.

Если мы вернемся к аналогии с магнитным полем, то увидим удивительное сходство между $\boldsymbol{\Omega}_{\text{ЛТ}}(r,\ \theta)$, даваемой соотношением (11.4), и магнитным полем $\boldsymbol{B}$, которое в случае заряженного вращающегося шара, как показывают расчеты в магнитостатике, зависит от r и θ точно так же, как и $\boldsymbol{\Omega}_{\text{ЛТ}}$:

$$\boldsymbol{B}=\frac{q}{2Mc^2r^3}\left(\boldsymbol{J}-\frac{3\boldsymbol{r}(\boldsymbol{rJ})}{r^2}\right), \qquad (11.5)$$

где M и q — масса и заряд шара.

Таким образом, полным аналогом индукции магнитного поля является угловая скорость $\Omega_{ЛТ}$, с которой вращающееся гравитирующее тело увлекает локально-инерциальные системы отсчета.

До настоящего времени из-за малости этого эффекта он никем не наблюдался. Только в 1959 г., через два года после запуска первого в мире искусственного спутника Земли, американский физик Шифф предложил вариант эксперимента, в котором можно было надеяться обнаружить этот эффект. Однако пока этот эксперимент еще не осуществлен, хотя для его подготовки сделано уже очень много.

Идея Шиффа заключается в том, чтобы вывести на полярную орбиту вокруг Земли высокочувствительный гироскоп.

Если ось гироскопа перпендикулярна плоскости орбиты, а орбита полярная (рис. 28), то ось гироскопа должна прецессировать (монотонно поворачиваться) относительно удаленных звезд на 0,05″ за год. Такой эффект будет наблюдаться, если высота орбиты над Землей много меньше радиуса Земли. Прецессия (поворот) гироскопа объясняется тем, что относительно локально-инерциальной системы отсчета направление оси вращения гироскопа неизменно, но сама локально-инерциальная система отсчета в соответствии с эффектом Лензе — Тирринга медленно поворачивается благодаря вращению Земли относительно удаленных звезд.

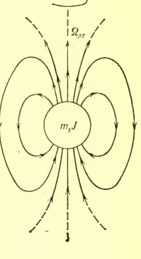


Рис. 27. Зависимость $\Omega_{ЛТ}$ от r и θ.

Эта оценка эффекта показывает, насколько трудно выполнить такой эксперимент. Во-первых, спутник, на котором будет установлен гироскоп, должен быть свободным от сноса (подробнее о таком спутнике см. приложение). Во-вторых, стабильность оси гироскопа должна быть не хуже чем 0,001″ за год. В-третьих, угловая стабилизация самого спутника (или хотя бы той его части, в которой происходит измерение угловых координат

гироскопа) также должна быть на уровне 0,001″ за год.

Эти три требования должны выполняться на орбите по крайней мере в течение нескольких месяцев, необходимых для того, чтобы проделать измерения.

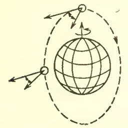


Рис. 28. Прецессия релятивистского гироскопа на полярной орбите.

С момента опубликования Шиффом статьи о релятивистском гироскопе (так обычно называют этот эксперимент) в одной из лабораторий Стэнфордского университета (США) выполнена большая подготовительная работа и проведены наземные испытания, однако первый запуск спутника с несколькими гироскопами на борту состоится, по-видимому, не ранее чем через несколько лет.

На рис. 29 схематически представлено устройство спутника, предназначенного только для проверки этого эффекта. Основная его часть — блок с несколькими одинаковыми гироскопами. Каждый из них представляет собой очень однородную сферу из плавленого кварца

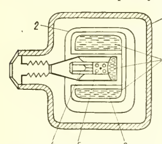


Рис. 29. Принципиальная схема спутника для измерения релятивистской прецессии гироскопа: *1* — корпус, *2* — тепловая изоляция, *3* — жидкий гелий, *4* — телескоп, *5* — один из гироскопов, *6* — пробное тело системы компенсации негравитационных ускорений.

(около 4 см в диаметре), покрытую сверхпроводником — ниобием. Для того чтобы исключить появление моментов, связанных с отличным от нуля квадрупольным моментом сферы и внутренними градиентами гравитационного поля самого спутника (эти моменты тоже вызывают прецессию), кварцевая сфера должна отвечать очень жестким требованиям. Допустимая относительная неоднородность кварца в сфере и допустимая несферичность не должны превышать $1\cdot10^{-6}$.

Гироскопы с помощью следящей электростатической системы подвешены внутри блока (также кварцевого).

Сферы раскручиваются примерно до 300 об/с струями газообразного гелия, затем струи выключаются, объем вокруг сфер откачивается до глубокого вакуума, а сама камера охлаждается до температуры жидкого гелия. Интересно отметить, что постоянная времени затухания такого гироскопа около 300 лет.

Для съема информации о положении оси гироскопа предложено изящное решение. Вращающийся сверхпроводник должен обладать магнитным моментом, пропорциональным угловой скорости вращения (эффект Лондона). Несколько чувствительных магнетометров располагаются вокруг сфер. Информация о магнитном поле, получаемая от них, должна позволить измерить положение оси вращения гироскопа с точностью до 0,001″.

Телескоп, с помощью которого ось спутника ориентируется на одну из ярких звезд, располагается прямо на блоке с гироскопами и, следовательно, тоже имеет температуру жидкого гелия. Сигналы с телескопа должны управлять реактивными микродвигателями угловой ориентации. Корпус телескопа, его линзы и призмы, разделяющие лучи для датчиков управления, изготовляются из плавленого кварца и соединяются на оптическом контакте (без клея или металлических стяжек).

Это краткое описание показывает, как непросто выполнить такой опыт и сколько труда и изобретательности он требует от экспериментаторов.

В настоящее время экспериментаторы совместно с теоретиками, в том числе и в Советском Союзе, интенсивно работают над созданием других схем опытов, в которых можно было бы обнаружить гравимагнитную составляющую гравитационного ускорения.

§ 12. КАК ЛОВЯТ ВОЛНЫ КРИВИЗНЫ

Детектирование гравитационных волн иногда связывают с проверкой ОТО... Я совершенно убежден, однако, в том, что главное в вопросе о приеме гравитационных волн другое — они образуют, можно сказать, новый канал, по которому может (и будет!) поступать к нам важная информация о космосе. Поэтому раньше или позже, но рождение гравитационно-волновой астрономии неизбежно. Чем раньше — тем лучше!

В. Л. Гинзбург «О физике и астрофизике» (М.: Наука, 1985, с. 96)

Уравнения электродинамики, которые описывают связь между электрическим и магнитным полями и электрическими зарядами и токами, представляют собой обобщение известных опытных фактов — законов

взаимодействия электрических зарядов и электрических токов. Анализ уравнений привел к неожиданному для современников Максвелла результату: одним из возможных решений этих уравнений является так называемое волновое решение: переменное движение электрических зарядов и переменные электрические токи являются источниками волн (электромагнитных волн), которые отрываются (по выражению выдающегося физика Х. Лоренца — «отпочковываются») от источника, существуют независимо от него и удаляются от него с очень большой скоростью. В 1880 г. Генрих Герц осуществил опыты, в которых было доказано существование электромагнитных волн. А еще несколькими годами позже также экспериментально было доказано, что свет есть электромагнитная волна и скорость распространения света в вакууме есть скорость распространения электромагнитных волн. Тогда же были детально изучены все особенности электромагнитных волн. В таких волнах вектор электрического поля перпендикулярен вектору магнитного поля и оба эти вектора в свою очередь перпендикулярны направлению распространения волны. Если удаляться от источника, то в вакууме на расстоянии R, существенно большем, чем размер источника, напряженность электрического поля $\boldsymbol{E}$ и индукция магнитного поля $\boldsymbol{B}$ будут уменьшаться обратно пропорционально расстоянию R. Нужно отметить, что все особенности электромагнитных волн, изученные экспериментаторами (например, поведение векторов $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{B}$ при преломлении волн на границе двух сред, при отражении и т. п.), не только качественно соответствовали предсказаниям, следовавшим из уравнений Максвелла. Физики-экспериментаторы, исследовавшие электромагнитные волны, наблюдали точное численное совпадение измерявшихся величин с расчетными, которые получались из уравнений Максвелла.

Затем в 1895 г. произошло событие, которое по праву считается революционным: наш соотечественник А. С. Попов первым успешно продемонстрировал возможность передавать информацию на большие расстояния, используя в качестве носителя информации электромагнитные волны. В течение 30—40 последовавших за этим лет появилось радио, телевидение, радиолокация, немного позже космическая связь и радиостромия. Одновременно (как это закономерно бывает в науке) электродинамика из передового фронта

исследований в физике превратилась в инженерную дисциплину, на основе которой рассчитывают передатчики и приемники телевизионных станций, радиотелескопы, антенны спутников связи и т. п.

Физики, которые заняты исследованием гравитационного взаимодействия, сейчас находятся (если пользоваться исторической аналогией) где-то между «Максвеллом и Герцем». Дело в том, что уравнениям Эйнштейна, так же как и уравнениям Максвелла, удовлетворяют волновые решения, т. е. должны существовать гравитационные волны (можно говорить — волны переменной кривизны), а гравитационный опыт Герца до настоящего времени еще не реализован. В этом параграфе мы остановимся подробно на проблеме обнаружения гравитационных волн и опишем то, что экспериментаторы уже сумели сделать для ее разрешения. В электродинамике Максвелла, как уже отмечалось, переменное движение электрического заряда приводит к излучению электромагнитной волны. Тот же результат содержится и в одном из решений уравнений Эйнштейна: переменное движение массы приводит к излучению гравитационной волны. Мощность излучения и в первом и во втором случае должна быть пропорциональна квадрату заряда (массы). Но из-за того, что гравитационное взаимодействие самое слабое, намного слабее электромагнитного (G мало), коэффициент пропорциональности, стоящий перед квадратом массы, в случае гравитационного излучения крайне мал — другими словами, эффективность гравитационного излучения чрезвычайно мала. Но, кроме этой количественной причины сравнительно малой эффективности гравитационного излучения, есть еще дополнительная причина, связанная с качественным различием электромагнитного и гравитационного взаимодействий. Это качественное различие заключается в следующем. Напомним, что в электродинамике есть электрические заряды двух знаков (электроны и протоны), отношение электрического заряда к массе может быть различно даже для тел, заряженных одноименно (различие в избытке или недостатке электронов); в гравитации же все заряды (гравитационные массы) одинаковы и одинаково отношение гравитационных зарядов к инертным массам. Последнее утверждение есть тот самый принцип эквивалентности, который в качестве постулата лежит в основе ОТО и согласуется с очень точными измерениями (см. § 7). Из-за этого качественного различия эффек-

тивность излучения гравитационных волн содержит дополнительный фактор малости. Понять, почему это так, поможет следующее простое качественное рассуждение. Представим себе изолированную систему из двух тел. Пусть тело массой m ускоряется переменной силой $F(t)$, действующей со стороны другого тела массой M, скажем, в положительном направлении оси x. Тогда тело массой M под действием силы $-F(t)$ должно ускоряться в противоположном направлении, так что общий центр масс системы должен оставаться на месте (третий закон механики Ньютона, справедливый, кстати сказать, и в теории относительности, если его сформулировать как закон сохранения импульса). Из-за того, что инертные массы тел равны их гравитационным массам, а ускорения двух тел обратно пропорциональны инертным массам и направлены в противоположные стороны, гравитационное излучение одной массы будет почти полностью «компенсироваться» излучением другой. Физики в этом случае говорят, что в гравитации нет дипольного излучения, а есть только квадрупольное. Дипольное излучение (дипольные излучатели) — случай, обычный в электродинамике,— излучение из-за движения двух полюсов диполя — двух разноименных зарядов, положительного и отрицательного. Читатель, конечно, много раз видел на крышах домов дипольные телевизионные антенны. Квадрупольное излучение — это излучение двух противоположно направленных диполей, которые почти полностью взаимно компенсируют друг друга. Эта картина гравитационного излучения (не только качественно, но и количественно) стала очевидной физикам сразу после создания ОТО. Если, например, представить, что в лаборатории мы раскачали механические колебания в стальной болванке массой 10 т (или заставили ее вращаться как ротор), то мощность гравитационного излучения не превысит 10^{-20} Вт, даже если амплитуды ускорения при колебаниях (или скорость вращения) будут близкими к предельным, когда болванка начнет разрушаться.

Пессимистическое настроение относительно возможности построить в лаборатории мощный источник гравитационного излучения сохранялось около 40 лет, пока не появилось новое направление в физике — релятивистская астрофизика. В этой области удивительно сочетаются тонкие, изящные эксперименты-наблюдения с теоретическими фантазиями (основанными, впрочем, на всем арсенале строгой современной теоретической физи-

ки). Астрофизики-теоретики интерпретируют наблюдательные данные, предлагают программы целенаправленных поисков качественно новых объектов и явлений. За последние 20 лет в астрофизике произошла буквально революция, если судить по количеству новых физических процессов и объектов, которые были предсказаны и обнаружены (или обнаружены и поняты). Астрофизики первыми поняли, что не обязательно стараться создать генератор гравитационных волн в земной лаборатории — можно воспользоваться естественными генераторами, которые нам предоставляет природа. Логика поиска таких генераторов основана на простом обстоятельстве, которое было уже отмечено в этом параграфе: мощность как электромагнитного, так и гравитационного излучения пропорциональна квадрату заряда (в гравитационном случае — квадрату массы m^2). Если увеличивать массу, то при прочих равных условиях эффективность излучателя должна расти. Здесь уместно вспомнить, что полный запас энергии в любом объекте массой m есть mc^2 (он пропорционален массе в первой степени!). Таким образом, можно ожидать, что с ростом массы «коэффициент полезного действия» (эффективность) преобразования массы в гравитационное излучение должен увеличиваться. Пионерские работы в этом направлении были выполнены советскими учеными Я. Б. Зельдовичем, И. Д. Новиковым, И. С. Кардашевым и И. С. Шкловским. В процессе выполнения этих работ оказалось, что для того чтобы ожидать действительно большого к. п. д., необходимо искать достаточно плотные звездные объекты, масса которых близка к солнечной или больше, а размеры не слишком велики,— тогда можно ожидать относительно высокочастотных всплесков. К настоящему времени количество теоретических работ астрофизиков, обзорных статей и книг, в которых рассмотрены различные, как принято говорить, «сценарии» генерации всплесков гравитационного излучения, превышает тысячу. Несколько упрощая, можно суммировать эти «сценарии» следующим образом: наиболее эффективными источниками гравитационного излучения должны быть такие астрофизические катастрофы, как столкновения нейтронных звезд, черных дыр (о них мы подробно будем рассказывать в § 13), взрывы сверхновых звезд, несимметричный коллапс звезды. В этих процессах можно ожидать, что несколько процентов от Mc^2 (где M — масса звезды) превратится в мощный всплеск гравитационного излу-

чения. Астрофизики-теоретики даже составили примерные таблицы, с какой вероятностью и как часто такие события должны происходить.

Из этих таблиц можно получить (правда, довольно грубую) оценку длительности, мощности и вероятности «прихода» на Землю импульса гравитационного излучения, который образуется в нашей Галактике (или в соседних) в результате одной из отмеченных выше астрофизических катастроф. Вот одна из «строк» такой «таблицы»: «Примерно один раз в месяц через Солнечную систему должен проходить импульс гравитационного излучения с длительностью 10^{-3}—10^{-4} с и через каждый квадратный сантиметр должно при этом проходить около 10^{-4} Дж». Читателя, возможно, удивит это фантастически большое значение плотности мощности: через тело читателя раз в месяц должно пройти в виде короткого всплеска около 1 Дж гравитационного излучения. Однако легко показать разумность такой оценки. Представим себе, что на расстоянии $R=10$ млн. св. лет от нас (это равно примерно $R\approx 10^{25}$ см) произошла одна из «нужных» нам астрофизических катастроф, в которой принимала участие звезда с массой в десять солнечных масс $M\approx$ $\approx 10M_{\odot}=2\cdot 10^{34}$г$=2\cdot 10^{31}$кг. Если предположить, что 10% от величины Mc^2 превратится во всплеск гравитационного излучения (для достаточно плотных звезд ОТО оценочно предсказывает именно такую эффективность преобразования массы в гравитационное излучение), то достаточно поделить 0,1 Mc^2 на площадь сферы $4\pi R^2$, и мы получим оценку 10^{-4} Дж/см². Отметим, что в радиусе $R\approx 10^{25}$ см$\approx$10 млн. св. лет содержится около 300 галактик, а в каждой галактике в среднем один раз в 30 лет наблюдается вспышка сверхновой звезды (один из кандидатов на роль эффективного генератора гравитационных всплесков). Из этих двух чисел и появляется оценка — на Земле разумно ожидать такое событие примерно раз в месяц.

Приведенную оценку мощности гравитационного всплеска и частоту его прохождения через Землю принято считать оптимистической. К сожалению, астрофизики-теоретики точно, в деталях, не знают, как происходят такие катастрофы. Многие из них считают вполне допустимым, что эффективность будет ниже (более симметричное движение масс), и поэтому рекомендуют в качестве оценки 10^{-6} Дж/см². Позицию астрофизиков-теоретиков можно описать примерно таким образом:

пусть экспериментаторы зарегистрируют всплески, а мы уточним наши приближенные модели астрофизических катастроф. Ожидаемая форма всплесков гравитационного излучения (их временная зависимость) также предсказана астрофизиками-теоретиками (см. рис. 30.)

Плотность гравитационного излучения 10^{-6} Дж/см^2 — это не так уж и мало. Действительно, если бы это было электромагнитное излучение, то зарегистрировать его можно было бы почти в домашних условиях, слегка переделав простой радиоприемник. Однако по тем же причинам, по которым в лабораторных условиях гравитационное излучение разумной мощности трудно получить, гравитационное излучение трудно и детектировать. Основные усилия физиков-экспериментаторов в 20 лабораториях разных стран на нашей планете направлены на создание достаточно чувствительных наземных гравитационных антенн, чтобы обнаружить именно такие короткие всплески гравитационного излучения.



Рис.30. Ожидаемая форма всплесков гравитационного излучения

Рассмотрим более подробно устройство гравитационных антенн. В соответствии с принципом эквивалентности две свободные массы в однородном гравитационом поле будут двигаться с одинаковым ускорением. Таким образом, из принципа эквивалентности следует, что любые приборы, которые нам вздумалось бы «вставить» между двумя свободными массами в однородном гравитационном поле, это поле не зарегистрируют. Но приведенное фундаментальное утверждение предполагает существование способа измерения. Ускорения двух масс (каждое порознь) можно измерить либо «извне» (т. е. из области, где нет гравитационного поля), либо «опираясь» (отсчитывая расстояния) на несвободную массу, движение которой определяется не только гравитационным полем. В земных условиях удобной физической системой отсчета для измерения ускорения свободного падения являются тела, лежащие на поверхности Земли: им мешают падать «вниз» (к центру Земли) силы упругости.

Теперь попытаемся качественно представить себе что такое гравитационная волна и в чем ее отличие о,

электромагнитной. Гравитационная волна — это область пространства переменной кривизны. Кривизна проявляется в виде переменных по времени и по пространству ускорений между пробными телами. Волна должна «убегать» от источника. Согласно ОТО скорость «убегания» (скорость распространения волны) должна быть равна скорости распространения электромагнитных волн. В связи с тем, что ускорения, вызванные гравитационным взаимодействием (в частности, ускорения в гравитационной волне), носят универсальный характер, т. е. одинаково действуют на любые массы, в точке (в сколь угодно малой области) гравитационную волну обнаружить нельзя. В этом заключается качественное различие между гравитационными и электромагнитными волнами.

Электромагнитную волну в принципе можно измерить в точке. Для этого достаточно поместить в ней две массы: одну заряженную с зарядом q, а вторую незаряженную (или заряженную противоположно). Чувствительный динамометр между массами зарегистрирует силу $F=Eq$ (где E — напряженность электрического поля в электромагнитной волне). Измерить гравитационную волну можно лишь в том случае, если расстояние между двумя массами (гравитационными зарядами) конечно. Иными словами, приемник (антенна) гравитационного излучения может обнаруживать лишь разность двух ускорений, т. е. относительные ускорения между двумя массами. Такие ускорения принято называть приливными, а гравитационные силы, вызывающие такие ускорения, называют приливными гравитационными силами. Приливная сила тем больше, чем быстрее меняется гравитационное поле от точки к точке и чем больше расстояние между точками. Именно этими силами объясняются, например, приливы и отливы в океане (отсюда и название): те точки мирового океана, которые обращены к Луне, притягиваются к Луне сильнее, чем точки мирового океана на противоположной стороне Земли, так как расположены ближе к Луне на 12 800 км (диаметр Земли). Поэтому в океане возникают два «горба», перемещающиеся относительно суши в ходе суточного вращения Земли, что воспринимается как чередующиеся приливы и отливы.

На примере гравитационных волн мы можем сделать важный физический вывод о свойстве гравитационного поля вообще: кривизна пространства-времени, соответствующая гравитационному полю, проявляется в виде

приливных ускорений. На рис. 31 изображена структура ускорений, создаваемых плоской гравитационной волной, распространяющейся в направлении z. Длина стрелок — векторов ускорений — пропорциональна амплитуде ускорений. Если мы поместим любые две массы на некотором расстоянии l друг от друга, то амплитуда ускорения будет тем больше, чем больше l. Это означает, что относительное смещение свободных пробных масс $\Delta l/l$, вызванное такой разностью ускорений, будет одним и тем же для всех пар пробных масс, лежащих на одной прямой. Эту величину в современной трактовке ОТО называют амплитудой вариации метрики пространства и обозначают h:

$$h \approx \frac{1}{2}\frac{\Delta l}{l}. \qquad (12.1)$$

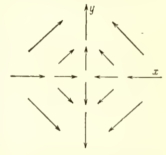


Рис. 31. Поле ускорений в плоскости xy, создаваемых гравитационной волной, которая распространяется вдоль оси z.

Ранее в этом параграфе мы приводили оптимистическое предсказание астрофизиков: примерно один раз в месяц на Землю должен «обрушиваться» всплеск гравитационного излучения длительностью 10^{-3}—10^{-4} с и плотностью потока энергии 10^{-4} Дж/см^2. Этим двум значениям соответствует значение $h \approx 2\cdot 10^{-19}$. Приведенная оценка означает, что при $l \approx 1$ м значение удлинения и последующего укорочения расстояния $\Delta l_{\text{гр}} \approx \approx {}^1/_2 lh \approx 1\cdot 10^{-17}$ см. Величина $\Delta l_{\text{гр}}$ очень мала, поэтому так трудно сделать гравитационную антенну с чувствительностью, достаточной для обнаружения даже очень мощных всплесков гравитационного излучения от астрофизических катастроф. Здесь уместно подчеркнуть, что согласно такому прогнозу астрофизиков читающий эти строки должен примерно раз в месяц в течение одной миллисекунды (или немного более короткого интервала времени) удлиниться и затем укоротиться примерно на $2\cdot 10^{-17}$ см (если рост читателя около двух метров). Пессимистический прогноз предсказывает, что гравитационная волна должна деформировать читателя на один-два порядка меньше.

Теперь можно рассмотреть принципы, положенные в основу разработки гравитационных антенн. Как это с

очевидностью следует из изложенного, создание достаточно чувствительной гравитационной антенны требует как минимум две пробные массы и чувствительное устройство, регистрирующее их относительное перемещение. Ясно также, что необходимо приложить максимум усилий, для того чтобы защитить (изолировать) пробные массы от силовых воздействий негравитационного происхождения (например, акустических и сейсмических шумов). Даже самые изобретательные экспериментаторы не могут быть уверены в совершенной надежности такой защиты пробных масс. Спасает положение «работа» двух антенн в синхронном режиме. Иначе такую схему измерений называют схемой совпадений. В записи колебаний относительного движения двух пар пробных масс в схеме совпадений необходимо выделять только такое «вздрагивание», которое одновременно происходит в двух парах. Тем самым можно исключить все негравитационные шумы местного происхождения и значительно ослабить роль внутренних шумов, о которых речь пойдет ниже.

В этой общей схеме наметились два различных направления разработок гравитационных антенн и, соответственно, два типа антенн. В первом из них используются связанные пробные массы на сравнительно малом расстоянии, а во втором — практически свободные массы, разнесенные относительно далеко друг от друга. Рассмотрим эти типы антенн несколько подробнее

Идея гравитационной антенны на связанных пробных массах принадлежит американскому физику Дж Веберу. Сущность идеи заключается в следующем: представим себе, что две массы соединены пружиной длиной l. Можно подобрать жесткость пружи ны таким образом, что период механических колебаний $\tau_{мех}$ будет приближенно равен длительности всплеска гравитационного излучения $\tau_{гр}$. В этом случае всплеск гравитационного излучения, создающий разность ускорений, ударно возбудит колебания в тачком механическом осцилляторе.

Ошибка в выборе величины $\tau_{мех}$ не существенна. Если $\tau_{мех}$ отличается на 50% от $\tau_{гр}$, то и при такой «плохой настройке» антенны амплитуда механических колебаний будет примерно равна $\Delta l_{гр} \approx 0{,}5\ hl$. Ударное возбуждение осциллятор будет «помнить» тем дольше, чем меньше в нем затухание, или, другими словами, чем больше в нем добротность $Q_{мех}$. О добротности мы

уже говорили в § 6, когда шла речь об электрических контурах. Этот термин имеет тот же смысл и для механических резонаторов.

Вместо двух масс и пружины можно использовать длинный цилиндр (из металла или диэлектрика) и регистрировать чувствительным датчиком малые продольные колебания такого цилиндра (рис. 32). (Длина цилиндра должна быть равна половине длины звуковой волны, а период этой звуковой волны должен быть примерно ра-

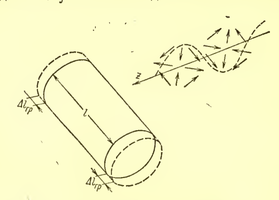


Рис. 32. Гравитационная волна, распространяющаяся вдоль оси z перпендикулярно к оси массивного цилиндра, возбуждает в нем механические колебания с амплитудой $\Delta l_{гр} \approx {}^1/_2 hl$.

вен $\tau_{гр}$.) Если учесть, что скорость звука в металлах и диэлектриках лежит в пределах от 10^6 до $5\cdot10^5$ см/с и что $\tau_{мех}\approx\tau_{гр}\approx10^{-3}$—$10^{-4}$ с, становится ясным выбор длины l таких цилиндров: она должна быть в пределах примерно от 50 см до 5 м. Именно такие цилиндры из алюминия были использованы в качестве основного элемента при разработке первых гравитационных антенн в конце 60-х и начале 70-х годов. Цилиндры имели диаметр от 70 см до 1 м и массу больше тонны. Они были помещены в вакуумные камеры (для акустической изоляции) и подвешены на «слоеном пироге» из стальных плит и резиновых прокладок (антисейсмическая изоляция). Датчики позволяли регистрировать изменения амплитуды малых продольных колебаний цилиндров вплоть до $1\cdot10^{-14}$ см, следовательно (см. (12.1)), чувствительность таких антенн была $h\approx1\cdot10^{-16}$. «Работа» в схеме совпадений на нескольких гравитационных антеннах в довольно большом количестве лабораторий разных стран (СССР,

США, Италия, Франция, Англия, ФРГ) привела к отрицательному результату; на этом уровне чувствительности первое поколение таких «твердотельных» гравитационных антенн дало однозначный ответ: в течение многих месяцев наблюдений всплесков гравитационного излучения обнаружено не было. Кстати сказать, это несомненно обрадовало (или, по крайней мере, успокоило) астрофизиков-теоретиков — ведь их оптимистическое предсказание $h \approx 2 \cdot 10^{-19}$, т. е. почти на три порядка меньше. В течение прошедшего десятилетия экспериментаторы, не успокоившиеся на первом отрицательном результате, интенсивно работали над созданием второго поколения твердотельных антенн.

Остановимся кратко на основных причинах (и трудностях), которые мешают существенно улучшить чувствительность. Первая из них — это тепловое движение. Тепловое движение (например, броуновское движение легкой пылинки, которое можно легко увидеть под микроскопом) есть общее свойство всех свободных и связанных масс, обладающих ненулевой (в абсолютной шкале) температурой. Средняя квадратичная кинетическая энергия случайного поступательного движения свободной массы есть $\frac{1}{2} m\overline{v^2} \approx \frac{3}{2} \kappa T$, где $\kappa = 1{,}4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, а T — температура в кельвинах. Горизонтальная черта над v^2 означает, что берется средняя величина за очень длительный промежуток времени. Для механического осциллятора тепловое случайное колебание может быть описано следующим образом: его среднеквадратичная амплитуда колебаний теплового происхождения $\sqrt{\overline{\Delta l_т^2}}$ равна

$$\sqrt{\overline{\Delta l_т^2}} \approx \sqrt{\kappa T / m\omega_{мех}^2}, \qquad (12.2)$$

где $\omega_{мех} = 2\pi/\tau_{мех}$ — собственная частота колебаний осциллятора. Чтобы проверить приведенную формулу на опыте, необходимо усреднять $\Delta l(t)$ за время, существенно большее, чем время затухания колебаний $\tau^*_{мех}$ механического осциллятора. Нетрудно показать, что механическая добротность $Q_{мех}$, период колебаний $\tau_{мех}$ и время затухания $\tau^*_{мех}$ связаны между собой простой формулой:

$$\tau^*_{мех} \approx \tau_{мех} Q_{мех}. \qquad (12.3)$$

Если экспериментатор станет измерять амплитуду колебаний осциллятора за относительно короткое время

$\hat{\tau}$, такое, что $\hat{\tau} \ll \tau^*_{мех}$, то он увидит, что наблюдаемая им величина $\delta l_т$ может существенно отличаться от $\sqrt{\overline{\Delta l^2_т}}$. Более того, за короткое время $\hat{\tau}$ случайное изменение амплитуды колебаний $\delta l_т$ будет тем меньше, чем «сильнее» неравенство $\hat{\tau}/\tau^*_{мех} \ll 1$; $\delta l_т$ можно выразить аналитически простыми соотношениями:

$$\delta l_т \approx \sqrt{\overline{\Delta l^2_т}} \sqrt{\frac{2\hat{\tau}}{\tau^*_{мех}}} \approx \sqrt{\frac{2\kappa T \hat{\tau}}{m\omega^2_{мех}\,\tau^*_{мех}}} \approx \sqrt{\frac{\kappa T \hat{\tau}}{m\omega_{мех} Q_{мех}}}. \quad (12.4)$$

Условие обнаружения твердотельной антенной отклика на всплеск гравитационного излучения будет выглядеть так:

$$0{,}5hl \approx \Delta l_{гр} > \delta l_т. \quad (12.5)$$

Так как $\Delta l_{гр}$ не зависит от массы, то, как видно из формулы (12.4), в распоряжении экспериментаторов для повышения чувствительности в этом варианте антенн есть только три возможности: увеличивать m, увеличивать $Q_{мех}$, уменьшать T. За десятилетие, прошедшее после работы с первым поколением гравитационных антенн, экспериментаторы добились некоторых успехов: они научились охлаждать пятитонные алюминиевые цилиндры до 2 К и достигать механической добротности $Q_{мех}$ у цилиндров из монокристаллов сапфира и кремния, превышающей $2 \cdot 10^9$ (у алюминия $Q_{мех} \approx 5 \cdot 10^6$ при гелиевых температурах).

Мы рассмотрели кратко шумы, которые принято называть внутренними, тепловыми, шумами твердотельных гравитационных антенн. Не останавливаясь на деталях устройства датчиков малых колебаний (это увело бы нас в сторону от основной темы книги), отметим, что для твердотельных антенн эта задача вчерне решена. В § 6 было кратко описано устройство емкостного датчика, с помощью которого при $\hat{\tau} = 10$ с уже умеют регистрировать амплитуды колебаний $\Delta l \approx 2 \cdot 10^{-17}$ см. Такое разрешение достаточно для получения чувствительности антенн, близкой к оптимистическому прогнозу астрофизиков.

Созданы датчики с хорошей чувствительностью, основанные на других принципах. Первые пробные запуски одной из антенн второго поколения показали, что

ее чувствительность соответствует $h \approx 3 \cdot 10^{-18}$, т. е. примерно на полтора порядка выше, чем чувствительность антенн первого поколения. Можно надеяться на то, что в ближайшие несколько лет будет достигнут уровень чувствительности, соответствующий $h \approx 2 \cdot 10^{-19}$, и будет проверен оптимистический прогноз астрофизиков.

Прежде чем перейти ко второму типу гравитационных антенн — антеннам на свободных массах, остановимся на одной физической проблеме, которая может быть сформулирована следующим образом: можно ли пользоваться выражением для $\delta l_{т}$ при сколь угодно низких T и сколь угодно больших $Q_{мех}$? По существу этот вопрос может быть переформулирован так: до каких малых величин низкочастотных колебаний δl экспериментатор может пользоваться классическими представлениями? Этот вопрос был поставлен в связи с разработкой гравитационных антенн. Однако очевидно, что он имеет и более широкую, общефизическую значимость. Ответ на него получен относительно недавно. Оказалось, что при достаточно больших $Q_{мех}$ и низких T макроскопический осциллятор (даже такой большой, как пятитонная алюминиевая болванка) нельзя рассматривать как классический объект. Чтобы получить правильный ответ на этот вопрос, вспомним следующее: квантовая механика запрещает одновременное и сколь угодно точное измерение некоторых пар величин. Так, например, произведение неопределенностей (неточностей) при измерении координаты Δl и импульса Δp не может быть меньше, чем половина постоянной Планка:

$$\Delta l \, \Delta p \geqslant \hbar/2. \qquad (12.6)$$

Это соотношение неопределенностей можно понимать так, что, измеряя координату с точностью Δl_1 у осциллятора массой m, мы сообщаем ему некоторый неизвестный импульс $\Delta p \geqslant \hbar/2\Delta l_1$. Через четверть периода собственных механических колебаний эта неопределенность импульса Δp превратится в неопределенность амплитуды (координаты)

$$\Delta l_2 \approx \frac{\Delta p}{m\omega_{мех}} \geqslant \frac{\hbar}{2m\omega_{мех}\Delta l_1}.$$

В процессе непрерывного измерения координат массы m погрешность измерений будет оставаться неизмен-

ной в том случае, если $\Delta l_2 \approx \Delta l_1$. Отсюда следует, что

$$\Delta l_{\min} \approx \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega_{\text{мех}}}}. \qquad (12.7)$$

Отметим, что полученный ответ не зависит от того, какой конкретный тип датчика, регистрирующего координату, избран. Этот ответ есть следствие законов квантовой механики и условия непрерывности слежения за координатой. Если мы подставим в полученную формулу $m = 10^6$ г и $\omega_{\text{мех}} = 10^4$ с$^{-1}$ (это параметры одного из вариантов твердотельных гравитационных антенн), то получим $\Delta l_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-19}$ см.

Сравнивая выражения для $\Delta l_{\min}$ и $\delta l_{\text{т}}$, можно получить условие для «границы», пересекая которую, экспериментатор, оперирующий с «вполне» макроскопическими механическими осцилляторами, столкнется с квантовой механикой:

$$2\kappa T\hat{\tau}/Q \leqslant \hbar. \qquad (12.8)$$

Если неравенство (12.8) выполнено, то классический подход к антенне неправомерен. Например, измеряя непрерывно изменение $l(t)$, нельзя в принципе обнаружить отклик, меньший, чем $\Delta l_{\min}$. Полученная оценка для $\Delta l_{\min}$ (если учесть, что $l \approx 1$—3 м) показывает, что твердотельные гравитационные антенны позволяют достигнуть чувствительности на уровне $h \sim 10^{-20}$ — 10^{-21}. Однако, чтобы получить лучшую чувствительность, необходима качественная перестройка процедуры измерения. К моменту написания этой книги принципиальная возможность обнаруживать отклики, меньшие, чем $\Delta l_{\min}$, уже найдена (например, путем отказа от непрерывности слежения за координатой). Правда, эти новые методы измерений пока находятся «на бумаге», и экспериментаторы только сейчас приступают к их разработке.

Рассмотрим теперь второй тип антенн — антенны со свободными массами. Главная идея, заложенная в их основу, состоит в том, чтобы, значительно увеличив расстояние l, получить существенно больший отклик $\Delta l \approx 0{,}5\ hl$. В результате резко ослабляются требования к изоляции антенны от внешних шумов, а также значительно уменьшаются требования к понижению внутренних (тепловых) шумов. Эти антенны пока существуют только в виде моделей (прототипов), самая большая из них имеет размеры около 40 м. Нормальный (рабочий) размер такой

антенны в разных проектах лежит в пределах от 1 до 10 км. Значение $\Delta l_{гр}$ в оптимистическом прогнозе должно быть примерно равно $2\cdot10^{-14}$—$2\cdot10^{-13}$ см. Ясно, что нельзя изготовить механический резонатор длиной около одного километра и потребовать, чтобы его собственная частота была равна 1 кГц или больше (в природе нет твердых тел, скорость звука в которых была бы 10^3 км/с). Именно поэтому, по «суровой» необходимости,

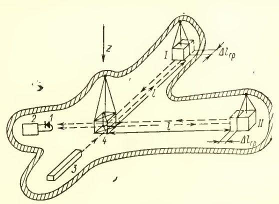


Рис. 33. Принципиальная схема лазерной гравитационной антенны. На рисунке показаны отклонения зеркал *I* и *II* ($\Delta l_{гр} \approx {}^1/_2 hl$), вызванные гравитационной волной, распространяющейся вдоль оси z; *1* — фотодетектор, *2* — усилитель, *3* — лазер; $\Delta l_{гр} \approx 10^{-14}$ см, $l \sim 10^5$ см.

такая антенна, не будучи резонатором, не имеет «памяти»: она «не звенит» после «удара», вызванного всплеском гравитационного излучения. Это означает, что отклик $\Delta l_{гр}$ необходимо измерять непосредственно в течение времени воздействия гравитационного импульса. Тем самым, с одной стороны, облегчаются требования к измерительному устройству ($\Delta l_{гр}$ больше), а с другой стороны, они усложняются (нельзя использовать длительное выделение сигнала).

С инженерной точки зрения гравитационная антенна на свободных массах представляет собой две трубы, соединенные под прямым углом, в которых поддерживается высокий вакуум. На концах труб на длинных нитях подвешены массивные зеркала (рис. 33), а в точке пересечения также на тонких нитях подвешен на массивной основе оптический «разделитель» лучей (пластинка, коэффициент отражения которой примерно равен коэф-

фициенту пропускания). Период собственных механических колебаний зеркал и оптического разделителя на нитях (он порядка 1 с) существенно больше, чем $\tau_{гр}$. Именно поэтому такие антенны называют антеннами на свободных массах. В такую систему от весьма стабильного по частоте и мощности лазера вводится поток световых квантов. Этот поток разделяется на два пучка, которые, отразившись от зеркал, снова складываются (интерферируют) и попадают на фотодетектор. Сдвиг зеркал приводит к смещению интерференционной картины. Фотодетектор и подключенный к нему усилитель должны различить очень малые смещения интерференционной картины. Антенны на свободных массах (иногда их называют лазерными гравитационными антеннами) пока немного «отстают» от твердотельных антенн. Первый запуск таких антенн можно ождать лишь через несколько лет.

Кроме наземных гравитационных антенн физики-экспериментаторы приступили к разработке спутниковых гравитационных антенн. Это также антенны со свободными массами. Расстояние l в них должно быть в несколько сот миллионов километров. Так как на таких расстояниях (да еще с учетом значительной разницы скоростей спутников и Земли) почти безнадежно удержать интерференционную «картину» на фотодетекторе (как это делается в наземной антенне), то задумано измерять не величину $\Delta l_{гр}$, а ее производную по времени (или точнее — вариации ее производной по времени) с помощью эффекта Доплера (см. § 6). Эти антенны рассчитаны на другой «сценарий» работы источников гравитационных волн, придуманный астрофизиками-теоретиками. В нем длительность всплесков должна быть значительно продолжительнее: $\tau_{гр} \approx 100—1000$ с, а величина h порядка $10^{-16}—10^{-17}$. На рис. 34 изображена схема одного из проектов такой антенны. Два космических корабля, запущенные с Земли в направлении Юпитера, должны «развернуться» в гравитационном поле этой гигантской планеты и выйти из плоскости Солнечной системы (из плоскости эклиптики), так что один из кораблей окажется «над» плоскостью эклиптики, а другой — «под» ней. В течение нескольких месяцев полета Земля и два спутника будут представлять собой две гравитационные антенны, которые можно использовать в схеме совпадений. Описанный проект, возможно, будет реализован в начале 90-х годов этого столетия.

В этом параграфе мы подробно рассказали о различных проектах (находящихся в разных стадиях подготовки) гравитационных антенн, рассчитанных на обнаружение всплесков гравитационного излучения от источников, которые должны были бы существовать с точки зрения астрофизиков-теоретиков. Есть ли на самом деле такие источники или нет и какова их эффективность — на эти вопросы может дать ответ лишь прямой опыт с

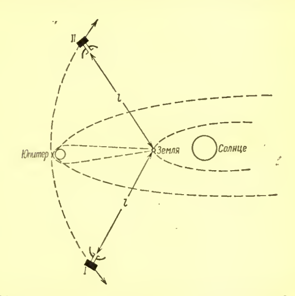


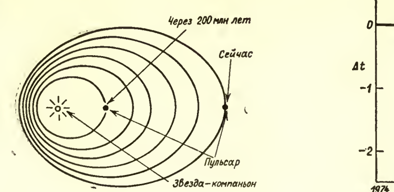
Рис. 34. Принципиальная схема опыта по обнаружению длинноволновых всплесков гравитационного излучения с помощью двух космических кораблей. Космические корабли I и II направляются с Земли в сторону Юпитера, гравитационное поле которого отклоняет их так, что космический корабль I выходит под плоскостью эклиптики, а космический корабль II — над плоскостью эклиптики.

антеннами. Вместе с тем в деталях известны надежно существующие источники: это тесные двойные системы (двойные звезды), период обращения которых составляет несколько часов. Наша уверенность в том, что двойные системы должны излучать гравитационные волны, основана на ОТО, так как в их движении есть переменное ускорение. Несколько двойных звезд, расположенных относительно недалеко от Земли, подробно изучены: для них известны и расстояние, и массы компонентов и с высокой точностью известен период. Однако, к сожа-

лению, даже самые «быстрые» из них, т. е. те, у которых наибольшие массы звезд и наибольшая частота обращения, дают слишком слабый поток гравитационного излучения. Амплитуда вариации метрики пространства от наиболее подходящей пары составляет $h \approx 2 \cdot 10^{-21}$. Период изменения метрики (он равен половине периода обращения компонентов вокруг общего центра масс) около двух часов. Ясно, что механический осциллятор с такой частотой сделать можно (крутильный маятник, например), но при этом необычайно трудно изолировать его от внешних помех (например, от проехавшего в километре грузовика). Точные (инженерного типа) расчеты показывают, что даже возможность длительно копить сигнал (ведь частота известна весьма точно) не спасает проект, другими словами, не делает его реальным в относительно скромных лабораторных условиях.

Тем не менее двойные системы оказались «полезными» для проверки фундаментального следствия ОТО — существования гравитационных волн. Эта проверка была выполнена недавно и дала неплохое подтверждение ОТО. Идея проверки (точнее сказать — тщательного наблюдения и сравнения полученных данных с расчетными) состоит в следующем: излучающая гравитационные волны пара звезд должна терять энергию. Это означает, что две звезды должны сближаться, а следовательно, период обращения должен укорачиваться. Таким образом, нужно измерить изменение периода и сопоставить полученное число с расчетным. Такой вариант проверки вывода ОТО был придуман около 20 лет назад, однако не было «подходящей» пары звезд: в двойной системе, состоящей из обычных звезд, если они расположены близко, возможно перетекание массы одной звезды на другую. В результате период может изменяться не только из-за потери энергии на гравитационное излучение.

Так продолжалось до тех пор, пока не был открыт ставший знаменитым пульсар в двойной системе PSR 1913+16 (старый знакомый по § 10). Эта двойная система состоит из двух компактных звезд. Одна из них — нейтронная звезда, проявляющаяся как пульсар. Очень возможно, что и другой компонент системы тоже является нейтронной звездой. Следовательно, возможность перетекания вещества с одной звезды на другую практически исключена. Многолетние наблюдения за периодом показали, что этот пульсар действительно теряет свою орбитальную энергию и что потери удовлетворительно



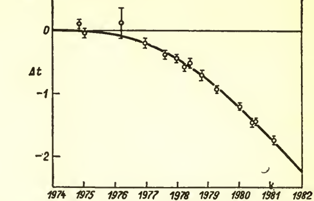


Рис. 35. Подтверждение существования гравитационного излучения (по пульсару в двойной системе PSR 1913+16). *а*) Уменьшение размеров орбиты пульсара связано с переходом энергии орбитального движения в энергию гравитационных волн. *б*) Благодаря излучению гравитационных волн пульсар проходит периастр со все возрастающим опережением по сравнению с тем, что можно было бы ожидать при постоянстве орбитального периода; Δt — сдвиг времени прохождения периастра.

совпадают с расчетом потерь на гравитационное излучение. Точность проверки ОТО в этих наблюдениях составила около 15%. Изменение периода обращения пульсара приводит к тому, что импульс радиоизлучения, испущенный в момент, когда пульсар проходит положение периастра, приходит к наблюдателю с некоторым опережением по фазе относительно предвычисленного момента прихода этого импульса. Поскольку время между приходом соседних импульсов растет линейно с номером импульса, то упомянутый сдвиг по фазе растет как квадрат времени наблюдений. За год такой сдвиг по фазе составил 0,04 с, но после 6 лет наблюдений этот сдвиг составил уже более секунды! На рис. 35, *б*, взятом из работы Дж. Вайсберга, Дж. Тейлора и А. Фаулера, видно удовлетворительное совпадение расчета, основанного на ОТО (жирная линия), и экспериментальных данных (кружки). Авторы указанной работы отмечают, что «в этом смысле пульсар можно рассматривать как не совсем исправные часы, которые сначала шли верно, однако постепенно начали уходить вперед, причем со все возрастающей скоростью».

Описанная проверка ОТО действительно подтверждает (хотя и не со слишком высокой точностью и косвенным образом) существование гравитационного излучения. Однако этот опыт не может сделать ненужными все усилия экспериментаторов, которые хотят прямо обнаружить воздействие гравитационных волн на их антенны. Когда такое воздействие будет обнаружено, будет одновременно получена и качественно новая астрофизическая информация о процессах в нашей Метагалактике. Иногда говорят, что будет открыт новый канал астрофизической информации: гравитационно-волновой (см. эпиграф к данному параграфу).

§ 13. КАК «УВИДЕТЬ» ЧЕРНУЮ ДЫРУ

— Взгляни-ка на дорогу! Кого ты там видишь?
— Никого,— сказала Алиса.
— Мне бы такое зрение! — заметил Король с завистью.— Увидеть Никого! Да еще на таком расстоянии!

Л. Кэрролл «Алиса в Зазеркалье»

До сих пор мы обсуждали главным образом эффекты слабого гравитационного поля. В данном параграфе речь пойдет о черных дырах, вблизи которых искривление пространства-времени становится настолько силь-

ным, что уже не сводится к малым поправкам к теории Ньютона.

Главный вопрос, на который мы постараемся дать ответ,— каковы наблюдательные проявления черных дыр, как их можно обнаружить? Но прежде всего коротко о физических свойствах этих удивительных объектов.

Черная дыра — это область пространства-времени, из которой ни один сигнал не может выбраться наружу. Граница, отделяющая эту область пространства-времени от всего остального мира, называется горизонтом событий: все, что происходит внутри горизонта событий, скрыто от глаз внешнего наблюдателя.

Черные дыры обладают настолько сильным гравитационным полем, что даже свет не может преодолеть их гравитационное притяжение. При таких чудовищных гравитационных полях теория Ньютона не применима, так сказать, даже в нулевом приближении.

Для описания свойств черных дыр необходима ОТО. Однако, как ни странно, сама возможность существования объектов типа черных дыр следует уже из ньютоновской теории. Чтобы показать это, воспользуемся понятием второй космической скорости. Напомним, что вторая космическая скорость для гравитирующей массы M — это та скорость, которую необходимо сообщить некоторому пробному телу, чтобы оно могло преодолеть гравитационное притяжение данной массы и улететь сколь угодно далеко от этой массы. (Для Земли вторая космическая скорость равна 11,2 км/с.)

Вторую космическую скорость можно выразить через массу M и радиус R гравитирующего тела:

$$v_{II} = \sqrt{2GM/R}, \qquad (13.1)$$

или через плотность гравитирующего тела $\rho = \frac{M}{^4/_3\pi R^3}$:

$$v_{II} = \sqrt{^8/_3\pi G\rho}\, R. \qquad (13.2)$$

Чем сильнее гравитационное поле, тем больше вторая космическая скорость. Поэтому, чтобы ответить на вопрос, сколь сильно гравитационное поле и сколь существенны различия между предсказаниями ОТО и ньютоновской теорией гравитации, достаточно сравнить вторую космическую скорость со скоростью света c:

$$\frac{v_{II}}{c} = \frac{1}{c}\sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2R}}. \qquad (13.3)$$

Из формулы (13.3) видно, что если R близко к величине

$$r_g = 2GM/c^2, \qquad (13.4)$$

то вторая космическая скорость близка к скорости света. Величина r_g называется гравитационным радиусом (или шварцшильдовским радиусом, по имени немецкого ученого К. Шварцшильда, который в 1916 г. впервые ввел эту величину).

Лаплас еще в 1795 г. писал: «Если бы диаметр светящейся звезды с той же плотностью, что и Земля, в двести пятьдесят раз превосходил диаметр Солнца, то вследствие притяжения звезды ни один из испущенных ею лучей не смог бы дойти до нас; следовательно, не исключено, что самые большие из светящихся тел по этой причине являются невидимыми». В правоте Лапласа легко убедиться, воспользовавшись формулой (13.2), из которой видно, что при заданной плотности вторая космическая скорость пропорциональна радиусу гравитирующего тела. Радиус Солнца примерно в 100 раз больше радиуса Земли, значит, радиус воображаемого тела, о котором говорил Лаплас, в 25 000 раз должен превышать радиус Земли: 11,2 км/с·25 000=280 000 км/с$\approx c$.

Таким образом, за 120 лет до создания ОТО Лаплас фактически предвосхитил предсказываемую ОТО возможность существования черных дыр — объектов, которые своим чудовищным гравитационным полем удерживают даже свет.

О черных дырах написано немало популярных книг. Мы рекомендуем читателю книгу И. Д. Новикова «Черные дыры во Вселенной» (М.: Знание, 1977) и книгу В. П. Фролова «Введение в физику черных дыр» (М.: Знание, 1983), а сами ограничимся описанием уже знакомых нам эффектов ОТО (см. §§ 8—11), но на этот раз не в слабом гравитационном поле Солнца, а в сверхсильном гравитационном поле черной дыры.

Как уже говорилось в § 8, темп хода часов, т. е. темп течения времени, тем медленнее, чем ближе часы к гравитирующему телу. Такое замедление времени проявляется в «покраснении» квантов, испущенных источником, который ближе к гравитирующему телу, чем приемник. А как изменяется темп течения времени, если приближаться к гравитационному радиусу r_g черной дыры? Оказывается, что время с точки зрения далекого наблюдателя вблизи r_g вообще останавливается.

Представим себе, что мы медленно опускаем к черной дыре на очень прочной веревке фонарик, который излучает свет определенной частоты ω_0. Частота света ω, принимаемая наблюдателем, который расположен от черной дыры дальше, чем наш фонарик, будет меньше частоты ω_0, измеряемой в собственной системе отсчета фонарика. При приближении фонарика к горизонту событий черной дыры частота света, измеряемая удаленным наблюдателем, стремится к нулю, т. е. испытывает бесконечное красное смещение. Если убрать веревку и позволить фонарику свободно падать в черную дыру, то принимаемая частота будет стремиться к нулю еще быстрее, поскольку эффект гравитационного красного смещения складывается с эффектом Доплера, который тоже уменьшает частоту принимаемого света: падая, фонарик движется от нас.

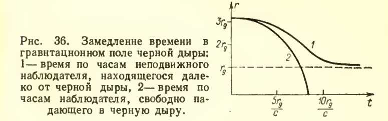
А как обстоит дело с голубым смещением, когда «приемник» расположен «ниже», чем «передатчик»? Чтобы убедиться в том, что гравитационное поле в этом случае «не шутит», представим себе мысленно такую фантастическую ситуацию. Звездолет оказался очень близко от черной дыры. Если в этот момент включаются сверхмощные двигатели, которые останавливают падение, то корабль может сгореть от ...звездного света! Любой фотон, приходящий от какой-нибудь далекой звезды, испытывает почти бесконечное голубое смещение и, следовательно, с точки зрения наблюдателя, находящегося вблизи горизонта черной дыры, энергия такого фотона огромна.

Если фонарик движется по какой-то нерадиальной орбите вокруг черной дыры, например по круговой орбите, то эффект Доплера будет попеременно то складываться, то вычитаться из гравитационного красного смещения. В результате будет наблюдаться смещение частоты попеременно то красное, то голубое. В принципе, по амплитуде колебаний частоты со временем можно было бы сделать вывод о том, что фонарик движется именно вокруг черной дыры. Если бы вокруг черной дыры вращался пульсар, мы имели бы прекрасную возможность для исследования гравитационного поля вокруг черной дыры.

Относительность времени, т. е. зависимость темпа хода часов от системы отсчета, проявляется вблизи черной дыры особенно ярко. Так, с точки зрения удаленного наблюдателя камень, свободно падающий на черную

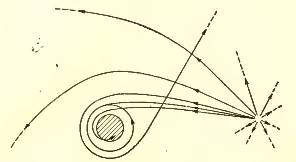
дыру, достнгиет гравитациоиного радиуса за бескоиечиое время, тогда как по часам наблюдателя, падающего вместе с камнем, пройдет конечный промежуток времеин, прежде чем такой наблюдатель пересечет горнзонт событнй (рнс. 36).

В § 9 мы познакомилнсь с нскрнвленнем лучей света в гравнтацнонном поле. Очевндно, что черная дыра тем



Рнс. 36. Замедленне времени в гравнтацнонном поле черной дыры: 1— время по часам неподвижного наблюдателя, находящегося далеко от черной дыры, 2— время по часам наблюдателя, свободно падающего в черную дыру.

сильнее отклоняет лучн света, чем блнже к гравитациоиному раднусу этн лучн проходят (см. формулу (9.1)). Но если луч света пройдет иа расстояннн 1,5 r_g, то он может иачать двнгаться по окружностн (рнс. 37). При определениых условнях вокруг чериых дыр могли бы



Рнс. 37. Искрнвленне лучей света в гравнтацнонном поле черной дыры.

даже образовываться своеобразные ореолы из фотонов, захваченных на круговые орбнты. (В свое время предложнлн нскать черные дыры по такнм ореолам. Правда, оценкн показывают, что шансы на успех здесь иевелнки.) Замкнутые световые орбнты иеустойчнвы: достаточио лучу света сколь угодно слабо отклонnться к бо́льшим радиусам, как луч, сделав несколько витков вокруг чер-

ной дыры, уйдет на бесконечность. При малом отклонении к меньшим радиусам луч по спирали попадает в черную дыру.

Необычна и небесная механика пробных тел вблизи черной дыры. Так, эллиптическая орбита, достаточно близко подходящая к черной дыре, может прецессировать за один оборот на очень большой угол (ср. с § 10).

Тела, прилетающие из бесконечности, типа комет, прежде чем снова уйти на бесконечность, могут сделать

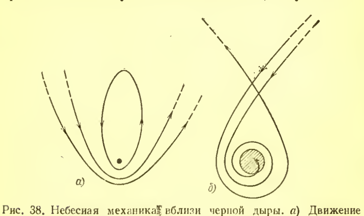


Рис. 38. Небесная механика вблизи черной дыры. *а*) Движение пробных тел по Ньютону (приводится для сравнения). *б*) Движение пробных тел по Эйнштейну.

несколько витков по окружности с радиусом, примерно вным $2r_g$ (рис. 38).

Если орбита тела проходит еще ближе от черной дыры, то тело упадет внутрь черной дыры.

Небесная механика вблизи черной дыры становится еще более сложной, если учесть гравитационное излучение, уносящее часть энергии орбитального движения. Так, тело, движущееся из бесконечности по гиперболе, пролетая достаточно близко от черной дыры, может потерять столько энергии в виде гравитационного излучения, что перейдет на эллиптическую орбиту, эллиптическая орбита постепенно превратится в круговую, затем радиус круговой орбиты будет медленно уменьшаться до тех пор, пока тело не перейдет на круговую орбиту с некоторым критическим радиусом, равным $3r_g$. При меньших радиусах круговых орбит не существует, и тело быстро сваливается в черную дыру, посылая в пространство последний всплеск гравитационного излучения.

Роль гравитационного излучения возрастает пропорционально отношению массы пробного тела m к массе черной дыры M. Поэтому не учитывать потерю энергии за счет гравитационного излучения можно лишь в случае очень малых m/M.

До сих пор мы описывали невращающиеся черные дыры. Забегая вперед, скажем, что черные дыры могут образовываться из звезд. Но звезды обладают угловым моментом вращения. Поэтому вполне вероятно, что и черные дыры, образовавшиеся из вращающихся звезд, тоже будут вращаться. В этом случае вокруг черной дыры должно возникать вихревое гравитационное поле. Другими словами, вращение черной дыры, так же как и вращение любого другого гравитирующего тела, проявляется в увлечении локально-инерциальных систем отсчета, т. е. приводит к вращению пространства-времени вблизи черной дыры (ср. с § 11).

Существует такая область, вне которой движение лучей света и пробных тел возможно как в направлении вращения, так и против вращения черной дыры, но внутри этой области увлечение пространства-времени становится настолько сильным, что никакое тело не может покоиться и увлекается в направлении вращения черной дыры. Границу этой области называют пределом статичности. Однако в отличие от случая невращающейся черной дыры невозможность покоя вовсе не означает, что тело или луч света неизбежно должен приближаться к черной дыре. Это лишь означает, что, подхваченное гравитационным вихрем, тело должно вращаться вокруг черной дыры.

Но если подойти еще ближе к черной дыре, то любое тело под действием гравитации неизбежно будет падать внутрь черной дыры. Тогда мы вновь имеем дело с уже знакомым нам горизонтом событий. На рис. 39 вращающаяся черная дыра показана сверху и сбоку. Видно, что на полюсе горизонт событий и предел статичности совпадают. Область между горизонтом событий и пределом статичности называют эргосферой, это слово происходит от греческого слова эргос — энергия. Причина, почему эта область получила такое название, связана с удивительным свойством вращающихся черных дыр: оказывается из них можно черпать энергию. На первый взгляд это кажется парадоксальным: ведь черная дыра — это область, из которой не может выйти ни вещество, ни свет, ни энергия. Это действительно так. Но часть энергии

чериой дыры, а имеиио эиергия вращеиия, заключеиа ие виутри чериой дыры, а в вихревом гравитациоииом поле, т. е. иаходится вие горизоита событий. Аиглийский теоретик Р. Пеироуз даже придумал способ извлечеиия эиергии из вращающейся чериой дыры. Кто зиает, может

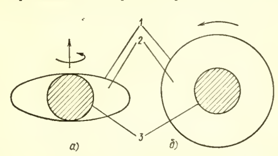


Рис. 39. Вращающаяся черная дыра: *а*) вид сбоку, *б*) вид сверху (экваториальная плоскость); *1* — предел статичности, *2* — эргосфера, *3* — горизонт событий.

быть эиергетика далекого будущего ие сможет обходиться без чериых дыр. Но это уже, скорее, область иаучиой фаитастики.

На этом мы закаичиваем описаиие свойств чериых дыр, а читателей, которые захотят позиакомиться с физикой чериых дыр поближе, отсылаем к цитироваииым выше киигам.

Теперь иесколько слов о том, как образуются чериые дыры.

Из теории звездиой эволюции известио, что чериые дыры могут образовываться иа заключительиых стадиях эволюции звезд, если их масса превосходит иекоторую критическую массу $M_{кр}$ ($M_{кр} \sim 2M_{\odot}$ или больше, в зависимости от еще иедостаточио изучеииых свойств вещества в сверхплотном состояиии). Другими словами, если звезда обладает массой $M > M_{кр}$, то иикакая сила давлеиия ие сможет остаиовить сжатия звезды, прежде чем радиус звезды достигиет гравитациоииого радиуса r_g, а тогда уже иикакие силы ие смогут противостоять гравитации. Среди звезд есть миого таких, масса которых заведомо во миого раз превышает $M_{кр}$. Едииствеииая возможиость для таких звезд избежать превращеиия в чериую дыру — это как-то «исхитриться» и сбросить избыточиую массу, превратившись в результате такого сброса в белый карлик или иейтроииую звезду. Некоторым звез-

дам это, безусловно, удается. Но трудно вообразить, чтобы каждая звезда, как замечает советский астрофизик И. С. Шкловский в своей книге «Звезды», (М.: Наука, 1984), «точно знала», сколько ей надо сбросить массы, чтобы катастрофического сжатия в точку не произошло. Можно даже очень грубо подсчитать, сколько таких черных дыр должно находиться в нашей Галактике.

Оказывается, что в одной только нашей Галактике, возможно, имеется около 1 млрд. черных дыр, являющихся останками проэволюционировавших, т. е. «умерших», звезд. Можно сравнить черные дыры с «захоронениями» некогда светящегося звездного вещества. О черных дырах иного, незвездного, происхождения мы еще скажем несколько слов, но позже.

«Но как в принципе можно их обнаружить?» — спросит внимательный читатель, который хорошо запомнил, что черные дыры ничего не излучают. Кроме того, размеры черных дыр столь малы и они находятся так далеко, что не стоит даже и пытаться искать их в виде черных пятен на небе, в которых не видно звезд. Отклонение света черными дырами тоже представляется малоперспективным: чтобы по отклонению света можно было судить, черная дыра отклонила свет или обычная звезда той же массы, луч света должен проходить очень близко от черной дыры, при этом требуется такое специально выбранное взаимное расположение источника, черной дыры и наблюдателя, что остается лишь надежда на случайность, но строить на этом программу поисков совершенно бессмысленно.

Но давайте рассуждать здраво. Все, что есть наблюдаемого в черной дыре,— это ее гравитационное поле. Если по какой-либо причине гравитационное поле вокруг черной дыры меняется, например, на нее падает звезда или другая черная дыра, то в пространстве распространяется волна кривизны — гравитационная волна. Сейчас, как мы уже отмечали в § 12, закладывается фундамент гравитационно-волновой астрономии, которая может быть в будущем и станет основным источником информации о черных дырах. Но и гравитационные волны еще непосредственно не обнаружены. Хотелось бы как-то обнаружить черные дыры независимо.

Итак, все, что остается от черной дыры во внешнем мире,— это ее гравитационное поле. Но гравитационное поле воздействует на окружение черной дыры, будь то

газ, пыль или соседние звезды. Остановимся пока на последней возможности. Пусть в некоторой двойной системе, один из компонентов которой — обычная, хорошо наблюдаемая звезда, а второй компонент — черная дыра. Наблюдая за движением видимой звезды, мы, в принципе, можем определить массу невидимого компонента, о котором мы еще ничего не знаем, а только подозреваем его в «чернодырости». Если вдруг окажется, что масса невидимого компонента намного больше массы Солнца, точнее, больше $M_{кр}$, то это будет служить почти полным доказательством того, что невидимый компонент — черная дыра. Действительно, ни белый карлик, ни нейтронная звезда такими большими массами обладать не могут, а обычная звезда тем ярче, чем массивней, и мы ее неизбежно бы заметили.

Такая программа поисков была впервые предложена советскими астрофизиками Я. Б. Зельдовичем и О. Х. Гусейновым. Однако анализ большого числа спектральных двойных систем с невидимым компонентом показал, что абсолютно во всех исследованных случаях невидимость одного из компонентов можно было бы объяснить, не прибегая к концепции черной дыры: например, «невидимость» была связана с тем, что более яркая видимая звезда затмевала менее яркую соседку. Кроме того, эта программа, несмотря на кажущуюся простоту, сталкивается с необычайными трудностями при определении масс компонентов двойной системы: оказывается необходимо точно знать расстояние до двойной системы, а неопределенности в расстоянии, к сожалению, очень велики.

Поиск черных дыр пошел несколько иначе. В качестве зонда, наблюдая за которым, мы надеемся обнаружить черную дыру, был выбран межзвездный газ. Падая под действием гравитационного поля на черную дыру, т. е. испытывая, как говорят астрофизики, аккрецию, газ нагревается и излучает энергию, как бы «кричит», прежде чем исчезнуть в черной дыре, о том, что с ним приключилось. Советский астрофизик В. Ф. Шварцман предложил искать одиночные черные дыры, аккрецирующие газ из межзвездной среды. В газе есть магнитное поле, при падении газа на черную дыру магнитное поле растет, возникает турбулентность, энергия которой превращается в тепло и высвечивается наружу. Поиски в этом направлении продолжаются и не кажутся безнадежными.

Где же искать черные дыры? В настоящее время произошел как бы синтез двух подходов, изложенных выше. По-видимому, больше всего шансов найти черную дыру в двойной системе по излучению аккрецирующего газа.

Теория эволюции звезд в тесных двойных звездных системах обнаруживает одно любопытнейшее явление, коренным образом отличающее эволюцию звезд в тесных двойных системах от эволюции звезд-одиночек. Речь идет о перетекании значительных масс вещества с одной звезды на другую. Та массивная звезда, которая превратилась в черную дыру, должна была передать «перед смертью» часть массы своему компаньону — менее массивной звезде. В результате такого перетекания массы темп эволюции видимой звезды, ставшей более массивной, убыстряется и вскоре она начинает разбухать, превращаться в гигант. Вещество теперь начинает совершать обратный путь — от разбухшей, не способной удержать



Рис. 40. Черная дыра в двойной звездной системе. *1* — черная дыра, *2* — нормальная звезда, теряющая массу, *3* — диск вокруг черной дыры, образованный перетекающим веществом.

свою внешнюю оболочку видимой звезды к компактному компоненту (который может быть не только черной дырой, но и нейтронной звездой). Темп падения вещества (темп аккреции) в этом случае намного превосходит темп

аккреции вещества на одиночную черную дыру в меж-звездной среде.

Но самое главное — газ не может сразу же упасть на черную дыру в двойной системе, потому что благодаря орбитальному движению обладает относительно черной дыры угловым моментом. Совершая чудовищно быстрые круговые движения вокруг черной дыры, он медленно оседает, переходя от одной круговой орбиты к другой, более близкой к черной дыре. Вокруг черной дыры образуется диск (рис. 40). Такой характер движения газа выгодно отличается от случая почти радиального падения вещества на одиночные черные дыры. Там падение было столь быстрым, что газ не успевал, прежде чем упасть на черную дыру, нагреться до столь высоких температур и высветить львиную долю тепловой энергии, как это происходит в случае дисковой аккреции. Теория дисковой аккреции в двойных системах подробно разработана советскими астрофизиками Р. А. Сюняевым, Н. И. Шакурой, И. Д. Новиковым и др. (подробнее см. *Шакура Н. И.* Нейтронные звезды и «черные дыры» в двойных системах.— М.: Знание, 1976). Газ нагревается до температуры в миллионы градусов и является поэтому мощным источником рентгеновского излучения.

Поиски черных дыр среди рентгеновских источников оказались не безрезультатными.

В двойной системе, содержащей звезду HDE 226 368, с помощью американского специального рентгеновского спутника «Ухуру» в 1972 г. был обнаружен рентгеновский источник, получивший название Лебедь Х-1. Невидимый в оптическом диапазоне длин волн компактный объект, вблизи которого формируется рентгеновское излучение, имеет массу около $10M_\odot$ и, возможно, является черной дырой. Некоторые исследователи относятся скептически к этому предположению, но для отстаивания своей позиции им уже сегодня приходится привлекать довольно сложные модели тройной (а не двойной) звезды. Кроме массивности компактного объекта есть еще один независимый аргумент в пользу того, что компактный источник Лебедь Х-1 содержит черную дыру. Дело в том, что была обнаружена быстрая хаотическая переменность рентгеновского излучения от этого источника (рис. 41). Подчеркнем, что хаотичность переменности хорошо согласуется с представлением о черной дыре, вблизи которой нет механизмов возникновения регулярной, периодической переменности, как это имело бы

место для окрестности нейтронной звезды. Быстрая переменность указывает на необычайную компактность объекта.

Итак, вполне вероятно, что в рентгеновском источнике Лебедь Х-1 обнаружена черная дыра. Среди рентгеновских источников в настоящее время имеются еще несколько кандидатов в черные дыры.

Говоря о проблеме поиска черных дыр, нельзя не отметить, что сегодняшняя астрофизика не ограничивается поисками черных дыр звездных масс, образовавшихся в результате эволюции звезд. В последнее время все более

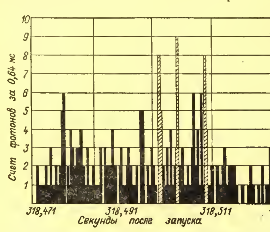


Рис. 41. Рентгеновское излучение источника Лебедь Х-1. Темные всплески — помехи, светлые — истинные всплески рентгеновского излучения.

привлекательной становится гипотеза о существовании сверхмассивных черных дыр, притаившихся в центрах плотных звездных систем, таких, как шаровые звездные скопления, ядра галактик и квазары. Надежда получить наблюдательные доказательства существования в указанных звездных системах черных дыр отнюдь не лишена оснований.

Теория предсказывает, что сверхмассивная черная дыра должна приводить к перераспределению звезд, так что в центре образуется узкий пик плотности звезд. На рис. 42 изображено ядро галактики М 87. Как показал спектральный анализ излучения звезд в этой галактике, распределение плотности и скоростей звезд вблизи центра указывает на то, что в центре находится почти

не светящийся объект размером всего лишь 300 св. лет, но имеющий массу около 6,5 млрд. масс Солнца. Гравитационный радиус тела с такой массой равен примерно 0,02 св. года. Поэтому внутри радиуса 300 св. лет может находиться какое-то другое компактное тело, не обязательно черная дыра. Тем не менее нельзя не признать, что данные по М 87 являются мощным аргументом в пользу «чернодырной» гипотезы. Кроме того, чудовищные приливные силы в гравитационном поле черной дыры разрывают подлетающие к ней звезды, в результа-



Рис. 42. Эллиптическая галактика М 87, в центре которой, возможно, находится черная дыра.

те вблизи черной дыры имеется много газа, который, падая на нее, образует диск, похожий на тот, что возникает в двойной системе, но существенно более массивный и, возможно, менее горячий.

Подобная картина привлекается некоторыми учеными для объяснения природы квазаров. В настоящее время нет недостатка в хороших теориях, объясняющих процессы в ядрах галактик и квазаров. Но пока трудно отдать предпочтение какой-либо из теорий. Можно лишь сказать, что среди лидеров в этом соревновании гипотеза черной дыры сейчас занимает одно из первых мест. Подождем до финиша. Накопление наблюдательных

данных, полученных во всех диапазонах электромагнитного спектра, от радио- до гамма-, с каждым днем приближает нас к разгадкам тайны квазаров и ядер галактик. Так, открытие переменной гамма-линии в центре нашей собственной Галактики, а также целый ряд инфракрасных и рентгеновских наблюдений побудил советских астрофизиков, Н. С. Кардашева и его сотрудников, выдвинуть гипотезу о так называемой «гамма-пушке», которая в качестве одного из наиболее важных элементов в «устройстве» содержит сверхмассивную черную дыру. Была высказана также идея о двойной черной дыре, расположенной вблизи центра нашей Галактики.

Мы еще вернемся к черным дырам в § 14, где будет сказано несколько слов о реликтовых, или первичных, черных дырах.

Итак, мы видим, что проблема обнаружения черных дыр в настоящее время актуальна не только для теоретической, но и для наблюдательной астрофизики.

§ 14. КАКАЯ ГРАВИТАЦИЯ НА ОКРАИНЕ МЕТАГАЛАКТИКИ

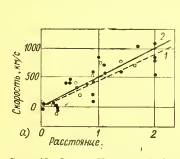
Пространство — это бесконечная сфера, центр повсюду, а окружности нет нигде.
Б. Паскаль «Мысли»

В начале 20-х годов нашего века выдающийся советский ученый А. А. Фридман воспользовался уравнениями Эйнштейна для построения математической модели, описывающей поведение вещества и геометрии Вселенной в целом. Результат, полученный Фридманом, был совершенно неожиданным: согласно ОТО Вселенная не может быть стационарной, она должна либо сжиматься, либо расширяться.

Надо отметить, что представления о неизменности свойств Вселенной в целом в те времена настолько прочно владели умами людей, что даже Эйнштейн не сразу согласился с выводами Фридмана.

Чуть позже выдающийся американский астроном-наблюдатель Э. Хаббл доказал, что Вселенная действительно расширяется — теоретическое предсказание, сделанное Фридманом, блестяще подтвердилось наблюдениями! Действительно, Хаббл (а еще раньше В. Слайфер) обнаружил красные смещения спектральных линий

в спектрах галактик и с полным основанием приписал эти смещения эффекту Доплера, с высокой точностью определив скорости, с которыми разбегаются галактики. Определив расстояния до галактик, Хаббл показал, что скорости взаимного удаления галактик пропорциональны расстоянию между ними — закон Хаббла (рис. 43). Именно этот закон подтверждает модель Фридмана.



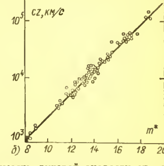


Рис. 43. Закон Хаббла. *а*) Зависимость лучевой скорости от расстояния в (Мпк) по Хабблу: *1* — по данным 1929 г., *2* — по данным 1936 г. *б*) Зависимость красного смещения *z* от видимой звездной величины m^* для далеких галактик по работе Сэндиджа 1972 г. Чем больше m^*, тем дальше галактика. Прямоугольник в начале координат — область данных, которыми располагал Хаббл.

В 1963 г. были открыты квазары — необычайно мощные и компактные источники излучения. К настоящему времени их открыто несколько сотен. Характерным свойством квазаров является огромное красное смещение в их спектрах, указывающее на то, что квазары удаляются от нас со скоростями, близкими к скорости света (рис. 44). Только модель расширяющейся Вселенной способна

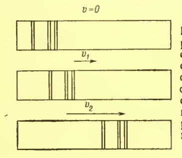


Рис. 44. Красное смещение в спектрах галактик и квазаров. На рисунке схематически изображена система каких-то хорошо известных спектральных линий. Чем больше скорость удаления объекта, тем сильнее смещаются линии в красную (длинноволновую) часть спектра, при этом взаимное расположение этих линий остается неизменным ($v_2 > v_1$).

объяснить этот удивительнейший факт — объекты с массами, во много миллиардов раз превышающие массу Солнца, уносятся от нас почти со скоростью света. Дело в том, что эти объекты очень далеки, а чем дальше объект, тем быстрее, согласно закону Хаббла, он от нас удаляется. Правда, делались попытки объяснить большие красные смещения квазаров иначе. Так, Дж. Бербидж высказал гипотезу о том, что красное смещение в спектрах квазаров связано не с эффектом Доплера, а имеет ту же природу, что и красное смещение частоты в гравитационном поле (рассмотренное нами в § 8); при этом гравитационные поля должны быть чудовищными. Гипотеза гравитационного красного смещения противоречит целому ряду наблюдений. Сегодня мало кто из ученых сомневается в космологической природе красного смещения квазаров; величина же красного смещения используется для определения возраста и удаленности квазаров.

Расстояние до самого далекого квазара, по-видимому, достигает 17 млрд. св. лет. Излучение от квазаров, принимаемое радио-, инфракрасными, ультрафиолетовыми, рентгеновскими и оптическими телескопами сегодня, было испущено ими, когда Вселенная была еще совсем юной, в несколько раз моложе, чем сегодня. Изучая квазары, мы пытаемся, кроме всего прочего, угадать, чем они стали сегодня: быть может, они потухли, став одинокими черными дырами, или только «попритихли», спрятавшись в ядрах галактик, и поэтому не является ли активность ядер галактик слабым отголоском их бурной «квазарной молодости»? Вот далеко не полный перечень встающих перед исследователями квазаров вопросов, которым посвящена, например, брошюра Б. В. Комберга «Загадочные квазары» (М.: Знание, 1981). Так или иначе, наблюдая квазары, мы заглядываем в прошлое, затрагиваем сокровенные тайны физической эволюции Вселенной. В этом смысле современный мощный телескоп чем-то схож с машиной времени, описанной писателем-фантастом Г. Уэлсом.

Теория расширяющейся Вселенной еще более упрочилась, когда в 1965 г. сотрудники американской научной лаборатории фирмы Белл А. Пензиас и Р. Вилсон, а затем американские астрономы во главе с Р. Дикки открыли радиоизлучение, приходящее со всех направлений из космоса с одинаковой интенсивностью. Спектр этого загадочного фонового излучения был таким, как если бы оно излучалось черным телом, «нагретым» до 3 К, или,

лучше сказать, охлажденным до —270 °С! Несмотря на то, что это излучение иначе чем «холодным» не назовешь, космологи сразу же поняли его физическую природу: это не что иное, как реликтовое излучение, испущенное давным-давно горячим веществом нашей Вселенной, когда еще не было не только звезд и галактик, но и древних квазаров. При расширении Вселенной излучение остывало, и, несмотря на то, что когда-то его температура достигала многих миллиардов кельвинов, к сегодняшнему дню оно успело остыть до температуры, которая столь мала ($<$ 3 К), что максимум интенсивности соответствует миллиметровым волнам.

Такой сценарий расширения и охлаждения когда-то горячего вещества и излучения получил название «теории горячей Вселенной», которую в качестве гипотезы еще в 40-х годах высказал американский теоретик Г. Гамов. Незадолго до открытия реликтового излучения на возможность его обнаружения указали советские астрофизики А. Г. Дорошкевич и И. Д. Новиков.

Таким образом, реликтовое излучение является свидетелем еще более ранней эволюции Вселенной, чем квазары — древнейшие из космических объектов — или, можно сказать, представляет собой наблюдательный «инструмент» в исследовании свойств ранней Вселенной. Реликтовое излучение играет фундаментальную роль в современной космологии. А. Пензиас и Р. Вилсон, которые впервые его обнаружили, стали лауреатами Нобелевской премии.

Это излучение несет на себе отпечаток тех событий, которые происходили во Вселенной до того, как образовалась наблюдаемая структура. В частности, начальные возмущения плотности и гравитационного поля, из которых впоследствии под действием гравитационной неустойчивости образовались скопления галактик и сами галактики, должны были оставить свой след в спектре и угловом распределении реликтового излучения. Поэтому поиски таких следов очень важны для проверки наших теоретических представлений о происхождении наблюдаемой структуры Вселенной. Наблюдения отклонений углового распределения реликтового излучения ведутся на многих радиотелескопах в СССР и за рубежом.

Есть еще один источник информации о ранней Вселенной — это соотношение между распространенностью во Вселенной легких элементов — водорода и гелия. Оказывается, что средние по Вселенной концентрации

водорода, гелия и изотопа водорода, дейтерия, существенным образом зависят от того, в каком темпе происходило расширение Вселенной в первые секунды и минуты ее жизни. Сравнивая наблюдаемые средние концентрации водорода, гелия и дейтерия с предсказаниями различных космологических моделей (в том числе не фридмановских), удалось отвергнуть многие из моделей.

Развитие физики элементарных частиц позволило теоретически «заглянуть» в еще более ранние мгновения Вселенной. На основе теории элементарных частиц в результате углубления представлений о свойствах физического вакуума удалось построить сценарий эволюции Вселенной от момента, когда ее возраст был примерно 10^{-40} с! Наметились пути для решения главных вопросов космологии: почему наблюдаемая нами Вселенная однородна в больших масштабах. Почему ее свойства одинаковы во всех направлениях (изотропия Вселенной)? Почему на каждый барион во Вселенной приходится примерно миллиард фотонов реликтового излучения и откуда взялись те начальные возмущения плотности и гравитационного поля, из которых образовалась наблюдаемая крупномасштабная структура Вселенной: сверхскопления и скопления галактик, галактики и звезды.

Проникновение в еще более ранние мгновения Вселенной требует коренной ломки наших представлений о пространстве и времени. Еще предстоит построить квантовую теорию гравитации. Сегодня лишь проглядывают контуры будущей единой теории всех взаимодействий, но, быть может, окончательное слово в космологии за ней.

Не углубляясь далее в удивительный мир современной физической космологии, мы рекомендуем читателю статьи Я. Б. Зельдовича, книги И. Д. Новикова, С. Вайнберга и Л. С. Марочника и П. Д. Насельского (см. приведенную в конце книги литературу).

Поскольку наша книжка посвящена гравитации, мы остановимся чуть подробнее на «гравитационном скелете» современной космологии, в основе которой лежат упомянутые выше космологические модели Фридмана, устанавливающие связь в духе ОТО между поведением вещества и геометрическими свойствами Вселенной как целого.

Модели Фридмана представляют собой решения уравнений Эйнштейна для однородного и изотропного распределения вещества. Основанием для того, чтобы счи-

тать Вселенную однородной и изотропной служит, во-первых, наблюдаемая однородность распределения видимого вещества в масштабах, превышающих 100 Мпк *) (хотя в меньших масштабах Вселенная крайне неоднородна — мы видим звезды, галактики, скопления галактик). Во-вторых, наблюдаемая изотропия реликтового излучения. В-третьих, наблюдаемая распространенность легких элементов указывает, что расширение Вселенной было скорее всего изотропным, по крайней мере, после первой секунды от начала расширения.

Модели Фридмана описывают поведение Вселенной в целом. Но Вселенная расширяется, и от начала расширения прошло конечное время $t=15$—20 млрд. лет, поэтому нашим наблюдениям в принципе доступна не вся Вселенная, а только некоторая ее часть. Свет за все время расширения Вселенной успевает дойти до нас с расстояний, не превышающих $ct \approx 15$—20 млрд. св. лет ≈ 5000—6000 Мпк. Доступная наблюдениям часть Вселенной получила название Метагалактики. ОТО с успехом описывает гравитацию во всей Метагалактике, по крайней мере, не противоречит наблюдениям. Тем не менее надо быть осторожным, когда мы экстраполируем выводы, полученные из изучения нашей Метагалактики, на всю Вселенную. Современная космология, в частности модели Фридмана, привлекает следующую гипотезу (космологический принцип): Вселенная повсюду одинакова, т. е. выглядит такой же, как и в нашей Метагалактике.

Модели Фридмана дают зависимость расстояния между двумя элементами массы (например, между двумя скоплениями галактик) от времени. Расширение Вселенной означает, что это расстояние растет. Расширение происходит всегда с замедлением. Оказывается, чтобы понять это, достаточно воспользоваться обычной теорией Ньютона. Выделим в расширяющейся однородной и изотропной Вселенной шар радиусом R. Проследим, как движется некоторая точка B, расположенная на границе шара, относительно точки A, расположенной в его центре. Ускорение точки B определяется только веществом внутри выделенного шара и равно

$$a = -GM/R^2. \qquad (14.1)$$

*) 1 Мпк $= 10^6$ пк, 1 пк (парсек) ≈ 3 св. года.

Поскольку $M={}^4/_3\pi R^3\rho$, где ρ — плотность вещества шара, т. е. средняя плотность вещества во Вселенной, то

$$a=-{}^4/_3\pi G\rho R, \qquad (14.2)$$

т. е. ускорение (или лучше сказать, замедление, поскольку ускорение отрицательно) пропорционально плотности ρ и расстоянию R между выбранными точками. Скорость v, с которой точки A и B удаляются друг от друга, тоже пропорциональна расстоянию R (закон Хаббла!):

$$v=HR, \qquad (14.3)$$

где H — постоянная Хаббла, определяемая из наблюдений.

Уравнения (14.2) и (14.3), дополнив их условием неизменности массы M ($\rho R^3=\text{const}$), можно записать в виде системы уравнений относительно R, ρ и H:

$$\frac{d^2R}{dt^2}=-\frac{4}{3}\pi G\rho R,$$
$$\frac{dR}{dt}=HR,$$
$$\rho R^3=\text{const}. \qquad (14,4)$$

Оказывается, что если ρ меньше некоторой критической плотности $\rho_{\text{кр}}$, то расширение, т. е. увеличение R будет продолжаться неограниченно; если же $\rho>\rho_{\text{кр}}$, то расширение сменится рано или поздно сжатием. Чтобы, не решая систему уравнений (14.4), получить значение критической плотности $\rho_{\text{кр}}$, воспользуемся аналогией со второй космической скоростью. Масса B никогда не «упадет» на массу A, если ее скорость v больше второй космической скорости, соответствующей массе вещества, заключенной внутри шара радиусом R:

$$v_{\text{II}}=\sqrt{2GM/R}=\sqrt{{}^8/_3\pi G\rho_{\text{кр}}}\,R. \qquad (14.5)$$

Из (14.3) и (14.5) получаем равенство, определяющее критическую плотность:

$$HR=\sqrt{{}^8/_3\pi G\rho_{\text{кр}}\,R}. \qquad (14.6)$$

Отсюда

$$\rho_{\text{кр}}=3H^2/8\pi G. \qquad (14.7)$$

Сегодняшнее значение постоянной Хаббла, полученное из наблюдений, составляет 75 км/(с·Мпк) *), поэтому $\rho_{кр} \approx 10^{-29}$ г/см³. Зная среднюю плотность во Вселенной и сравнив ее с $\rho_{кр}$, можно предсказать будущую судьбу нашей Вселенной. При $\rho \leqslant \rho_{кр}$ расширение будет продолжаться неограниченно долго. А при $\rho > > \rho_{кр}$ рано или поздно наступит сжатие: вместо красного смещения в спектрах галактик будет наблюдаться голубое смещение и в конце концов Вселенная вернется

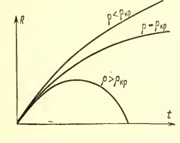


Рис. 45. Судьба Вселенной в зависимости от ее средней плотности ρ. По оси абсцисс отложено время, а по оси ординат расстояние R между двумя произвольными, достаточно удаленными друг от друга галактиками.

к сверхкритическому состоянию, из которого она начала свое расширение (рис. 45).

Поэтому, одной из важнейших проблем космологии является определение средней плотности вещества во Вселенной. Если все светящееся, а значит, видимое вещество равномерно распределить по Вселенной, то получится значение плотности $\rho = 3 \cdot 10^{-31}$ г/см³, которое меньше $\rho_{кр}$. Но очень вероятно, что существуют какие-то формы темной, трудно обнаруживаемой материи (скрытой массы). Это могут быть остывшие звезды, межзвездный газ или какие-то экзотические формы материи: первичные черные дыры (о них несколько слов ниже) или еще не открытые на Земле элементарные частицы и т. д. Проблема скрытой массы окончательно не решена, но ведутся интенсивные поиски возможных косвенных проявлений скрытой массы, например, скрытую массу в скоплениях галактик пытаются обнаружить по ее гравитационному влиянию на движение отдельных галактик в скоплениях. Эта проблема стала особенно актуальной после того, как появились сообщения об открытии массы покоя у нейтрино. Хотя окончательного подтверждения этого результата еще нет, но космологи-

*) Правда, существуют расхождения при определении значения H между разными группами наблюдателей. Не исключено, что $H = 50$ км/(с · Мпк).

ческие следствия наличия массы покоя у нейтрино столь значительны, что космологи уже сегодня интенсивно «обыгрывают» различные сценарии эволюции Вселенной (в частности, образование нейтринной структуры, на которую потом «натекает» светящееся вещество). Поэтому не исключено, что скрытая масса заключена в нейтрино и полная средняя плотность вещества во Вселенной близка к $\rho_{кр}$ (или даже больше).

Заканчивая этот параграф, необходимо выяснить роль ОТО в космологии. Ведь система уравнений (14.3), (14.4), из которых следуют важные выводы о судьбе Вселенной, получена с помощью чисто ньютоновских рассуждений. Исторически, как уже отмечалось, космологические модели были построены Фридманом в рамках ОТО за 10 лет до того, как была осознана возможность использования в космологии ньютоновской теории. И это не случайно. Во-первых, в ньютоновской теории существует так называемый гравитационный парадокс: неоднозначность вычисления гравитационной силы. Только поступая совершенно определенным образом — выделяя шар и вычисляя гравитационную силу, действующую на частицу вблизи границы шара, можно было получить уравнения и результаты, согласующиеся с ОТО. Поэтому, не зная заранее ответа (полученного Фридманом), использовать ньютоновскую теорию было по меньшей мере рискованно (подробнее см. кн.: *Новиков И. Д.* Эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1983).

Во-вторых, ньютоновская теория справедлива только в сравнительно малых масштабах. Действительно, если увеличивать радиус шара R, то рано или поздно вторая космическая скорость станет равна скорости света, $v_{II} = c$. Это произойдет при

$$v_{II} = \sqrt{{}^8/_3 \pi G \rho} R_{кр} = c, \qquad (14.8)$$

т. е. при

$$R_{кр} = \sqrt{3c^2/(8\pi G\rho)}. \qquad (14.9)$$

Например, при $\rho = \rho_{кр}$ получим, что $R_{кр} \approx 3 \cdot 10^{10}$ пк. Как мы знаем (см. § 13 о черных дырах), в таких масштабах пользоваться ньютоновской теорией уже нельзя.

Оказывается, что трехмерное пространство Вселенной искривлено, характерный радиус кривизны примерно равен $R_{кр}$. Если $\rho < \rho_{кр}$, то трехмерное пространство открыто, в том смысле, что хотя оно и искривлено, но простирается во все стороны до бесконечности. Если $\rho > \rho_{кр}$,

то пространство замкнуто: если лететь от Земли все время в одном направлении, то прилетишь опять к Земле. (Правда, если вспомнить о том, что при $\rho > \rho_{кр}$ Вселенная сначала расширяется, а потом сжимается, то раньше, чем прилетишь обратно к Земле, Вселенная успеет сжаться.)

Возникает вопрос: нельзя ли с помощью каких-то наблюдений измерить кривизну пространства, а по ней определить среднюю плотность вещества во Вселенной? В принципе, это возможно. ОТО предсказывает отклонение от простого закона Хаббла для очень далеких объектов, т. е. для объектов с большими красными смещениями, которые определяют следующим образом: $z = \Delta\omega/\omega$. Как следствие эффекта Доплера $z \approx v/c$ *).

На практике строят зависимость так называемой видимой звездной величины объекта m^* от z (или наоборот, z от m^*). Мы не будем во всех подробностях рассказывать здесь, как в астрономии определяют величину m^*. Важно лишь следующее: m^* зависит линейно от логарифма потока излучения, приходящего на Землю. Если предположить, что все источники исследуемого класса (например, квазары) излучают в пространство за единицу времени примерно одинаковые количества энергии, то, очевидно, поток у Земли будет обратно пропорционален квадрату расстояния до источника. Следовательно, m^* является линейной функцией логарифма расстояния. Значит, если закон Хаббла (см. формулу (14.3)) справедлив для любых сколь угодно больших расстояний (т. е. для сколь угодно больших z), то зависимость $\log z$ от m^* должна быть линейной. Любые отклонения от закона Хаббла приводят к отклонению зависимости $z(m^*)$ (в логарифмических координатах) от прямой линии (рис. 46).

Указанные отклонения от прямой могли бы использоваться для определения кривизны мира. Но, помимо чисто технических трудностей, связанных с наблюдением очень далеких объектов — квазаров, существует еще и принципиальная трудность. Дело в том, что за время, сравнимое с возрастом Вселенной, квазары сильно эволюционируют, т. е. их светимость в далеком прошлом была, по-видимому, существенно больше, чем в последующую эпоху. Учет такой эволюции тоже приводит к отклонению зависимости $z(m^*)$ от прямой. И пока не

*) Эта простая формула справедлива для не очень больших скоростей. При $v \lessapprox c$ необходимо учитывать эффекты СТО.

будут ясны законы эволюции квазаров, указанный метод определения кривизны мира использовать не удастся.

Та же трудность, связанная с эволюцией объектов, возникает и при подсчете числа радиогалактик: если бы они не эволюционировали, то по зависимости числа радиогалактик от светимости можно было бы определить кривизну Вселенной.

Таким образом, вопрос о независимом определении кривизны остается открытым, исследования в этом на-

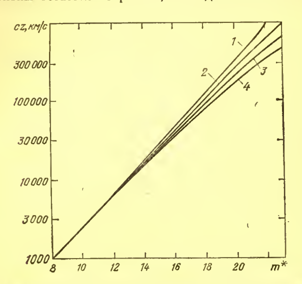


Рис. 46. Зависимость красного смещения z от видимой звездной величины m^*, предсказываемая различными космологическими моделями: *1* — закрытая вселенная, $\rho > \rho_{кр}$, *2* — пространственно плоская вселенная, $\rho = \rho_{кр}$, *3* — открытая вселенная, $\rho < \rho_{кр}$, *4* — модель нерасширяющейся (стационарной) вселенной.

правлении продолжаются. Повышение разрешающей способности за счет увеличения базы в радиоинтерферометрии позволит (см. § 6) определять угловые размеры θ очень далеких объектов. Зависимость θ от z, как оказалось, тоже чувствительна к кривизне мира.

Кроме прямых измерений конкретных космологических величин (постоянной Хаббла, средней плотности, кривизны пространства и т. д.), в современной космологии часто предпринимаются попытки по совокупности астрофизических данных получить косвенные ограничения на те или иные величины, чтобы на основе этих

ограничений попытаться что-то сказать о ранней Вселенной. В качестве примера можно упомянуть об ограничениях на так называемые первичные черные дыры, на возможность существования которых впервые указали Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков.

Из § 13 мы знаем, что в сегодняшней Вселенной могут образовываться черные дыры с массами, превышающими массу Солнца. Однако в прошлом, когда Вселенная была очень плотной, могли образовываться черные дыры сколь угодно малых масс (вплоть до масс порядка 10^{-5} г). Количество таких черных дыр теснейшим образом связано с характером возмущений плотности и гравитационного поля, которые существовали с самого начала расширения Вселенной. И хотя первичные черные дыры пока не обнаружены и можно дать лишь ограничения на их число (на основе целого ряда наблюдательных данных), уже можно с достаточной определенностью сказать, что Вселенная в начале своего расширения была не слишком хаотической, т. е. указанные возмущения были не слишком велики. (Подробнее о проблеме первичных черных дыр см. статью И. Д. Новикова и А. Г. Полнарева.)

На этом мы заканчиваем краткий рассказ о значении гравитации для Вселенной в целом и о ее роли в современной космологии.

§ 15. ПОСТОЯННА ЛИ ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ? (О ДРУГИХ ТЕОРИЯХ ГРАВИТАЦИИ)

Истина одна и та же и в Париже и в Тулузе.
Б. Паскаль (Из письма к Ферма)

В предыдущих параграфах этой книги мы познакомились с общей теорией относительности, главным образом с экспериментальным и наблюдательным фундаментом, на который эта теория опирается. Мы убедились, что до сих пор ни один эксперимент, ни одно наблюдение не вступали в противоречие с ОТО. Но, как следует из приводимого в § 1 высказывания А. Эйнштейна, ни один эксперимент не может подтвердить теорию, а может лишь ее опровергнуть. Кроме того, несмотря на значительный прогресс в гравитационном эксперименте, достигнутый в последние 10—20 лет, экспериментальный базис ОТО остается относительно скудным, что, как мы уже знаем,

объясняется слабостью гравитационного взаимодействия. Поэтому наш рассказ о гравитационном эксперименте не будет полным, если не затронуть вопрос о возможной справедливости других теорий гравитации, отличных от ОТО, которые так же, как и ОТО, не противоречат на сегодняшний день всей совокупности экспериментальных и наблюдательных данных.

Этот вопрос приобретает особую остроту в связи с открытием «экзотических» астрономических объектов, в которых именно эффекты сильного гравитационного поля играют важную роль. Исследуя пульсары, компактные рентгеновские источники, квазары, реликтовое излучение, ученые строят модели явлений, происходящих в этих объектах. Как правило, при этом приходится пользоваться предсказаниями теории не только в области слабых гравитационных полей, для которых ОТО можно считать проверенной с хорошей точностью, но и в области сильных полей. Например, некоторые модели компактных рентгеновских источников или квазаров включают в себя черные дыры. Можно сказать, что предсказания ОТО, относящиеся к сильным гравитационным полям,— это в известном смысле экстраполяция. Чтобы оценить надежность такой экстраполяции, полезно познакомиться с другими, как говорят, альтернативными, моделями гравитационной теории.

В 60-х и 70-х годах был предложен целый ряд таких моделей, понадобились даже «теории гравитационных теорий», необходимые для классификации альтернативных моделей и их экспериментальных следствий. Прежде всего к такой «теории теорий» относится так называемая система (или систематика) Дикки (о ней коротко говорилось в § 7), которая ставит перед собой задачу проанализировать самые основы гравитационной теории и выработать критерии жизнеспособности выдвигаемых моделей. Кратко эти критерии формулируются следующим образом.

1. Теория (модель) должна быть полной, т. е. должна объяснять «из первых принципов» результат любого эксперимента, конечно, если явления, затрагиваемые в этом эксперименте, не выходят за область применимости модели.

2. Теория должна быть самосогласованной, т. е. любое ее предсказание должно быть однозначным. Например, теорию Ньютона в этом смысле самосогласованной считать нельзя: ее предсказание относительно пове-

дения бесконечного распределения вещества неоднозначно, а зависит от способа рассуждений (см. § 14, где упомянуто о гравитационном парадоксе).

3. Теория должна быть релятивистской, т. е. в малых областях пространства-времени, когда гравитационным взаимодействием можно пренебречь по сравнению с другими взаимодействиями, должна быть справедлива СТО.

4. Теория должна давать правильный ньютоновский предел в области слабых гравитационных полей и медленных движений.

5. Теория должна включать в себя так называемый слабый принцип эквивалентности, который мы можем сформулировать так (ср. формулировку принципа эквивалентности, приведенную в § 4): мировая линия пробного электрически нейтрального тела зависит только от начальных условий, но не от его внутренней структуры и химического состава. Этот принцип, как заметит внимательный читатель, не что иное, как принцип универсальности свободного падения.

6. Теория должна содержать принцип универсальности гравитационного смещения частоты (см. § 8): гравитационное смещение частоты или разность темпа хода идеально правильных часов между двумя событиями пространства-времени определяется только мировыми линиями источника и приемника (или часов), но не зависит от их структуры и химического состава.

Первые два критерия Дикки носят чисто теоретический характер, тогда как остальные четыре имеют опытное обоснование. Критерий 3 основан на всей совокупности экспериментов по проверке СТО (см. § 3): критерий 4 — на успехах ньютоновской теории в объяснении движения небесных тел и в лабораторных экспериментах типа опыта Кавендиша (см. §§ 2 и 10); критерий 5 — на экспериментах, доказывающих универсальность свободного падения (см. § 7); и, наконец, критерий 6 основан на экспериментах, описанных в § 8.

Среди всех предложенных и мыслимых теорий, удовлетворяющих изложенным выше шести критериям жизнеспособности, следует выделить важнейший подкласс теорий, которые называются метрическими (ОТО принадлежит именно к этому подклассу).

Чтобы понять, что это за теории, необходимо, во-первых, уточнить упомянутый в § 4 эйнштейновский принцип эквивалентности и, во-вторых, чуть глубже затро-

нуть вопрос о том, как описывается геометрия пространства-времени.

Более точная формулировка указанного выше принципа эквивалентности такова: 1) справедливы слабый принцип эквивалентности и принцип универсальности гравитационного смещения частоты; 2) результат любого мыслимого негравитационного эксперимента в свободно падающей системе отсчета не зависит от того, где и когда во Вселенной этот эксперимент проводился, и не зависит от скорости системы отсчета.

Теперь несколько слов о способе описания геометрии пространства-времени. Напомним, что именно геометрические свойства пространства-времени проявляются в виде гравитации. Оказывается, что для полного описания геометрии пространства-времени достаточно знать, как связаны бесконечно малые приращения четырех координат (трех пространственных dx, dy, dz и одной временно́й dt) с физическим интервалом ds (см. § 3) между двумя бесконечно близкими состояниями в пространстве-времени. Если повсюду в пространстве-времени в произвольной системе отсчета такая связь задана, то говорят, что задана «метрика» пространства-времени. Например, соотношение

$$ds^2 = (c\,dt)^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \qquad (15.1)$$

определяет метрику в пространстве-времени Минковского. А еще более простое и привычное соотношение, следующее из теоремы Пифагора, определяет все геометрические свойства евклидова пространства:

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2. \qquad (15.2)$$

В случае искривленного пространства-времени, да еще в произвольных криволинейных (гауссовых) координатах связь между ds^2 и dx^2, dy^2, dz^2 и dt^2 будет куда сложнее, чем соотношение (15.1). Но при этом сохранится важнейшее свойство такой связи: она останется, как впервые понял математик Риман, «квадратичной». Это означает, что все усложнения сведутся, во-первых, к появлению некоторых коэффициентов при dx^2, dy^2, dz^2 и dt^2 (например, вместо слагаемого dx^2 может появиться слагаемое $f(x, y, z, t)dx^2$) и, во-вторых, к появлению слагаемого типа $\varphi(x, y, z, t)dx\,dy$ или $F(x, y, z, t)\,dt\,dx$ и т. д. Задание метрики (и тем самым определение всех геометрических свойств пространства-времени) означает,

по существу, задание «коэффициентов, f, φ и F и т. д.*), изменяющихся при переходе от одной точки пространства-времени к другой. А сами указанные коэффициенты еще называют потенциалами гравитационного поля. Всего этих потенциалов десять (вместо одного-единственного в ньютоновской теории гравитации) и все они определяются распределением и движением материи.

Теперь мы уже готовы сформулировать постулаты, на которых строится любая метрическая теория гравитации: 1) в физическом пространстве-времени метрика действительно существует; 2) мировые линии пробных тел являются геодезическими этой метрики (см. § 4); 3) удовлетворяется эйнштейновский принцип эквивалентности, а локальные негравитационные законы в свободно падающих системах отсчета сводятся к законам СТО.

Существует гипотеза, высказанная Шиффом, согласно которой все критерии жизнеспособности гравитационной теории сводятся к постулатам метрических теорий, т. е. любая жизнеспособная теория должна быть метрической. Пока гипотеза Шиффа до конца не доказана, но есть серьезные основания верить в справедливость этой гипотезы, что означает сильное сужение класса возможных теорий гравитации.

Укажем теперь, какое место занимает ОТО среди других метрических теорий.

Мы уже неоднократно отмечали, что гравитация как искривленность пространства-времени определяется распределением плотности и скорости материи. Казалось бы, что вещество всей Вселенной должно оказывать влияние на локальную гравитационную физику. Например, гравитационная постоянная могла бы зависеть от плотности Вселенной, как это и предсказывается некоторыми альтернативными теориями гравитации. В ОТО такое влияние отсутствует. Дело в том, что Эйнштейн, сформулировав свой принцип эквивалентности, построил простейший вариант теории, удовлетворяющей этому принципу. В некоторых более сложных теориях гравитации, наряду с метрикой, присутствуют еще и другие гравитационные поля, которые не проявляются непосредственно в движении пробных тел (это движение определяется только метрикой), но косвенно, наряду с вещест-

*) Для единообразия обозначений указанных коэффициентов принято записывать их в виде величин с двумя индексами, например, $f = g_{11}$, $\varphi = g_{12}$, $F = g_{01}$ и т. д.

вом, влияют на саму метрику. Другими словами, опыт почти однозначно указывает на то, что пробные тела движутся по геодезическим в некоторой метрике, но оставляет произвол в написании уравнений, определяющих вид этой метрики.

Все метрические теории включают дополнительные гравитационные поля и этим отличаются от ОТО. Именно из-за этих дополнительных полей глобальные свойства Вселенной влияют на локальную гравитационную физику. Так, некоторые теории предсказывают медленные изменения со временем величины гравитационной постоянной G в ходе эволюции Вселенной.

Однако ряд астрономических наблюдений позволяет дать сильные ограничения на темп изменения G и тем самым наложить сильные ограничения на параметры тех теорий гравитации, которые предсказывают изменение G со временем. Указанные ограничения были получены из анализа эволюции скоплений галактик, эволюции Солнца, колебаний Луны, а также по радиолокации планет. Кроме того, предложен ряд лабораторных экспериментов. Совсем недавно экспериментаторы измеряли медленные вариации параметров орбит планет с помощью радиолокационного слежения за спутниками, выведенными на круговые орбиты вокруг близких к Земле планет. Результаты таких длительных измерений позволили установить следующий предел для возможного относительного изменения гравитационной постоянной G во времени:

$$\Delta G/G \lesssim 0{,}4 \cdot 10^{-11} \text{ за 1 год.} \qquad (15.3)$$

Если учесть, что время, прошедшее с начала расширения Вселенной, составляет $10^{10} \approx 2 \cdot 10^{10}$ лет, то очевидно, что за все время эволюции Вселенной величина G могла измениться не слишком сильно. Но даже медленные вариации G, не противоречащие ограничениям (15.3), могли бы существенно сказаться на эволюции очень ранней Вселенной. Поэтому ограничения на $\Delta G/G$ представляют особый интерес для космологии.

К совершенно другому типу «теории теорий» принадлежит так называемый параметризованный постньютоновский формализм (ППН-формализм). Несмотря на такое, на первый взгляд, мудреное название, смысл этого формализма чрезвычайно прост. Любая теория должна давать количественные предсказания гравитационных эффектов в слабом гравитационном поле, в

частности, давать поправки к предсказаниям ньютоновской теории (постньютоновские поправки). Оказывается, что, несмотря на сильные различия основ теорий и методов их построения, можно ввести примерно десять параметров (их называют ППН-параметрами), таких, что любой гравитационный эффект в самом общем случае может быть выражен через измеряемые величины (расстояние, скорость и т. д.) и некоторые комбинации этих десяти параметров. Таким образом, измерения, описанные в §§ 7—11, могут рассматриваться как ограничения на те или иные ППН-параметры. Следовательно, ППН-формализм устанавливает некоторый порядок среди конкурирующих теорий. Каждая альтернативная теория, прежде чем вступить в «честную борьбу» с ОТО и другими теориями, должна выдать в качестве своей «визитной карточки» набор предсказываемых ППН-параметров или допустимую область этих параметров. Сопоставление этой информации с экспериментом иногда отвергает ту или иную теорию, иногда дает на нее ограничения.

Еще раз подчеркнем, что ОТО до сих пор выдержала все подобного рода испытания. А что будет дальше — покажут будущие эксперименты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы надеются, что читатель, познакомившийся с предшествовавшими пятнадцатью параграфами этой книги, почувствовал, насколько глубже и шире сегодняшнее понимание гравитационного взаимодействия по сравнению с представлениями Ньютона. ОТО согласуется с целым рядом опытов, делает качественные предсказания, которые еще предстоит проверить (например, она предсказывает гравитационные вихри, гравитационные волны, черные дыры), так что экспериментаторам и наблюдателям есть над чем работать. Да и перед теоретиками стоит еще множество нерешенных задач.

Во-первых, в рамках самой ОТО, по мере развития экспериментальных и наблюдательных возмо ностей, возникают задачи, например, такого рода: ка ие возможны источники гравитационного излучения, как надежнее рассчитать форму приходящих на Землю всплесков или по каким конкретным наблюдательным прояв-

лениям черных дыр можно с уверенностью судить о их существовании. Конечно, в такой небольшой книжке нельзя осветить все проблемы. Так, в книгу не включены проблемы рождения частиц в сильных гравитационных полях, квантовое испарение черных дыр, проблемы космологической сингулярности, почти не затронута проблема происхождения структуры Вселенной и многие другие вопросы.

Во-вторых, почти ничего не было сказано о проблеме квантования гравитационных полей, объединяющей все известные взаимодействия, а без такой теории гравитации не обойтись при изучении самого начала расширения Вселенной.

Другими словами, у читателя не должно создаться впечатления, что изложенным в этой книге исчерпывается весь круг проблем гравитационной физики.

Но, как мы надеемся, уже из того, что в этой книге отражено, читатель может сделать вывод о бурном проникновении эксперимента и наблюдений в некогда чисто теоретические разделы физики гравитационного взаимодействия.

Растущий экспериментальный и наблюдательный потенциал нашей планеты, расширение «лаборатории» до масштабов Солнечной системы и всей Вселенной в целом дают нам уверенность, что в будущем нам удастся проникнуть в еще более удивительные тайны гравитационного взаимодействия, глубже понять его роль в мироздании, как в макро-, так и в микромире.

КАКАЯ ПОЛЬЗА ОТ ГРАВИМЕТРИИ И ЕСТЬ ЛИ НЕВЕСОМОСТЬ НА ОРБИТЕ?

Все, что излагалось в предшествующих параграфах, было посвящено фундаментальным свойствам гравитационного взаимодействия, основным положениям ОТО, экспериментам, где проверялась теория гравитации, астрофизическим наблюдениям, для объяснения которых требовалось привлечение ОТО. Вместе с тем не следует считать, что физики и инженеры, занятые разработкой высокочувствительных приборов для измерения гравитационного поля, ставят перед собой единственную цель — исследовать закономерности, носящие фундаментальный характер. Умение с высокой точностью измерять гравитационные ускорения, их разности или их изменения, позволяет решать целый ряд важных прикладных задач.

Этот раздел представляет собой некоторое отклонение от чисто физического и астрофизического направлений книги (почему и вынесен в приложение) — он посвящен, так сказать, практическим земным и околоземным гравитационным проблемам. Читатель, по-видимому, хорошо знает, что утверждение «Земля имеет форму шара» справедливо лишь «в первом приближении». Утверждение о сплюснутости Земли со стороны полюсов — это лишь «второе приближение». «В третьем приближении» форму Земли определяет неоднородный рельеф (горы, долины, моря, океаны). Очевидно, что эта геометрическая неоднородность вместе с неоднородностями плотности земных пород, прилегающих к поверхности, приводит к значительным различиям ускорения свободного падения g для разных географических районов.

Детальное изучение неоднородности в распределении g на поверхности Земли — это одна из задач специальной дисциплины — гравиметрии, стоящей на стыке физики и геофизики. Ясно, что знание о том, как изменяется величина g при перемещении вдоль поверхности Земли, может дать исключительно полезную для гео-

логов информацию о плотности прилегающих («снизу») к поверхности земных пород в определенном районе. А такая оценка в свою очередь может быть косвенным указанием на залегание полезных ископаемых и, следовательно, рекомендацией к пробному бурению (которое много дороже, чем измерение g на поверхности). Сейчас обычный полевой (как говорят геологи) прибор — гравиметр — позволяет измерить g с точностью до одной миллионной доли. Принцип действия полевых гравиметров весьма прост: это либо маятник и для определения g измеряется период его колебаний, либо масса на пружине, удлинение которой пропорционально величине g.Однако они обладают рядом существенных недостатков. Вот один из них: из-за монотонного и неконтролируемого изменения длины маятника или пружины, как говорят, ползет нуль-пункт. Это значит, что такой прибор нужно каким-то образом калибровать.

Обычно производят несколько измерений в разных точках Земли и, вернувшись в исходную точку, еще раз сличают первое измерение g с последним (контрольным). Такая процедура позволяет исключить накапливающиеся в процессе измерения ошибки. При этом необходимо быть уверенным в том, что в течение всего времени измерений нуль-пункт ползет монотонно. Кроме того, указанная процедура калибровки предполагает, что изменения g в исходной точке за все время измерений не существенны. Но это не обязательно так, поскольку есть монотонные движения различных районов Земли (вверх, вниз и «вбок»), которые приводят к изменению g во времени. Из этого описания ясно, что маятниковые и пружинные полевые гравиметры хороши лишь для относительных измерений, и для их калибровки требуется абсолютный гравиметр. Термин «абсолютный» здесь имеет тот же смысл, что и метрологический стандарт (как, например, водородный стандарт частоты). Такой абсолютный гравиметр был относительно недавно создан. В его разработку внесли большой вклад советские ученые из Сибирского отделения АН СССР.

Чтобы понять принцип действия абсолютного гравиметра, вспомним, что при свободном падении в вакууме при нулевой начальной скорости высота H связана со временем падения t простым соотношением:

$$H = {}^1/_2\, gt^2. \qquad (\text{П.1})$$

Измерив H и t, можно определить величину g. Абсолютный (его также называют баллистическим) гравиметр содержит трубу, из которой выкачан воздух. В ней падает стеклянная призма (рис. 47). Лазерный луч отражается от этой призмы и вместе с другим лучом от того же лазера дает интерференционную картину. Фотодетектор поставлен так, что ему удобно отсчитывать сдвиг

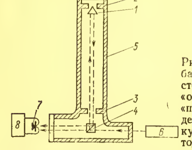


Рис. 47. Принципиальная схема баллистического гравиметра: 1 — стеклянная призма, 2 — система «отпускания» призмы, 3 — система «подхватывания» призмы, 4 — разделитель оптических лучей, 5 — вакуумная камера, 6 — лазер, 7 — фотодетектор, 8 — счетчик импульсов.

интерференционной картины: если призма по вертикали смещается на половину длины оптической волны, то фотодетектор выдает импульс. Таким образом, высота H соответствует нескольким миллионам оптических полуволн (если H порядка метра), и задача не слишком сложной электронной схемы состоит в том, чтобы сосчитать соответствующие несколько миллионов импульсов и одновременно «засечь» время, которое пройдет, пока идет счет. Очевидно, нужно в качестве составного элемента гравиметра иметь стандарт времени и точно знать частоту лазера (или его длину волны).

Из приведенного (значительно упрощенного) описания абсолютного гравиметра следует, что это не «полевой», а, так сказать, «стационарный» прибор. Однако его очевидное преимущество — высокая точность. Несколько таких гравиметров, изготовленных в разных странах, когда их привезли в одно место и сличили их показания, дали разброс в измерениях g не более $1 \cdot 10^{-8}$. Но и это не предел. Вспомним, что частоту (и время) сейчас умеют «хранить» с относительной точностью $3 \cdot 10^{-13}$ (см. § 6). Следовательно, в будущем можно ожидать повышения чувствительности этого прибора.

Неоднородность в распределении ускорения свободного падения весьма заметно сказывается на движении спутников Земли: орбиты спутников даже в рамках

ньютоновской теории должны существенно отличаться от чисто эллиптических. Если учесть еще, что Земля вращается, и в разные моменты времени движения околоземного спутника под теми участками орбиты, по которым спутник собирается пролететь, может оказаться «дополнительная» масса (например, горный массив), то становится очевидным, что и плоскость орбиты тоже может изменяться во времени.

На первый взгляд, казалось бы, удобно (с точностью, например, до сантиметра — такая точность вполне доступна, см. § 6) измерять в определенные моменты времени координаты спутника и затем по этим координатам и моментам времени определять распределение g на разных высотах вдоль всей земной поверхности с точностью не ниже, чем $1\cdot10^{-6}g$. Однако такая процедура не годится, потому что реальные околоземные спутники движутся не по точно геодезическим орбитам. Иными словами, на орбите нет полной невесомости.

Последнее утверждение находится в кажущемся противоречии с тем, что вы, читатели, видели по телевизору и в кино: свободно «плавающие» в отсеках космических кораблей космонавты, которые к тому же демонстрируют парящие бортовые журналы, незакрепленные предметы и т. п. Однако если можно было бы подождать около часа, исключить циркуляцию воздуха в отсеках околоземной космической станции, то можно было бы увидеть заметное «скапливание» всех свободно плавающих предметов на станции вблизи одной из ее стенок. Причин, почему это так, несколько. Например, низколетящие околоземные спутники немного тормозятся в верхних слоях атмосферы; относительно небольшой спутник с массой 200 кг и площадью около 2 м^2 на высоте круговой орбиты 400 км тормозится атмосферой с ускорением $\sim3\cdot10^{-6}$ м/с^2. Давление солнечного излучения также относительно велико: для такого же небольшого спутника оно приводит к ускорению (или замедлению, в зависимости от ориентации направления движения спутника по отношению к Солнцу) порядка $3\cdot10^{-8}$ м/с^2. Заметим, что на высотах орбит порядка 500 км ускорения, вызванные остатками атмосферы и давлением солнечного излучения, примерно равны. Заметный вклад в негравитационное ускорение спутника вносит и давление солнечного ветра (потока протонов и электронов, испускаемых Солнцем). Таким образом, на спутники действуют поверхностные силы, которые приводят к за-

метным негравитационным ускорениям. Действительно, негравитационное ускорение $3 \cdot 10^{-6}$ м/с^2 за 10 суток приведет к отклонению от чисто ньютоновского движения спутника примерно на $^1/_2 \cdot 3 \cdot 10^{-6}$ м/с$^2 \cdot (10^6$с$)^2 \approx 1{,}5 \cdot 10^6$ м$=$ $=1500$ км. Из-за этих негравитационных ускорений необходимо систематически следить за спутниками и постоянно вносить коррекцию их орбит. Вот почему обычный спутник неудобен для точного измерения ускорения свободного падения на орбите.

Как мы отмечали выше, перечисленные силы, воздействующие на спутник (мы не упомянули воздействие микрометеоритов, которое значительно слабее трех основных отмеченных сил), являются поверхностными силами. Это значит, что тело, помещенное внутрь спутника (если пренебречь на время собственным гравитационным полем спутника), будет стремиться, до первого качания, двигаться по траектории, существенно более близкой к геодезической, чем сам спутник.

Спутник можно сделать достаточно симметричным, так, чтобы в небольшой области внутри спутника его собственное гравитационное поле было почти скомпенсировано. Если поместить туда пробное тело, окруженное бесконтактными датчиками малых смещений, которые управляют тягой реактивных микродвигателей, то в целом такой спутник будет двигаться, повторяя движение пробного тела, поскольку все поверхностные силы, которые «сносят» его с геодезической траектории, будут скомпенсированы тягой микродвигателей. Такой спутник и был назван спутником, свободным от сноса (рис. 48).

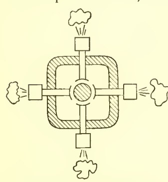


Рис. 48. Принципиальная схема спутника, свободного от сноса.

Совершенно ясно, что для прецизионных измерений гравитационного поля Солнца и планет спутники, свободные от сноса, незаменимы. Первый такой спутник (он назывался «Трайяд-1») был запущен учеными США в 1972 г. и испытывался в течение целого года. Для того чтобы уменьшить величину магнитного поля, которое создается самим пробным телом и не может быть ском-

пенсировано следящей системой, пробное тело было изготовлено из сплава платины и золота — двух материалов, обладающих диа- и парамагнитными свойствами. В результате суммарная магнитная проницаемость пробного тела оказалась на два порядка меньше, чем у обычных неферромагнитных тел.

Испытания, проведенные с «Трайядом-1», показали, что уровень компенсации негравитационных ускорений достиг 10^{-8} см/с^2. Высота орбиты спутника над поверхностью Земли была около 800 км. Это означает, что уровень компенсации негравитационных ускорений доходил до 0,1%, что дало возможность с точностью до 100 м прогнозировать местоположение спутника на орбите на две недели вперед. Для обычных спутников отклонения за сутки, которые необходимо корректировать, составляют сотни метров. Таким образом, спутники, свободные от сноса, могут служить хорошими навигационными ориентирами.

Мы не будем останавливаться здесь на требованиях, предъявляемых к устройству спутника, свободного от сноса. Конечно, для создания такого спутника требуется решить сложные технические задачи. Однако, как показывают расчеты, в ближайшие годы, по-видимому удается компенсировать негравитационные ускорения с точностью до 10^{-10} см/с^2

В этом разделе подробно рассмотрены два прибора, с помощью которых можно очень точно измерять ускорения вблизи Земли (на ее поверхности и на орбите). Наземная и околоземная гравиметрия продолжает и сейчас интенсивно развиваться. Эта дисциплина, как уже отмечалось выше, позволяет решать важные задачи геологической разведки. Можно ожидать, что в недалеком будущем гравиметры будут широко использоваться на Луне, Марсе и других планетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Альберт Эйнштейн и теория гравитации. Сб. статей.— М.: Мир, 1979.

Асламазов Л. Г. Сила Кориолиса. Неинерциальные системы отсчета.— Квант, 1983, № 10, с. 9.

Блинников С. И. Белые карлики.— М.: Знание, 1978.

Брагинский В. Б. Экспериментальная проверка теории относительности.— М.: Знание, 1977.

Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной.— М.: Энергоиздат, 1981.

Гинзбург В. Л. О теории относительности.— М.: Наука, 1979.

Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике.— М.: Наука, 1985.

Дикке Р. Гравитация и Вселенная.— М.: Мир, 1972.

Дьюрелл К. Азбука теории относительности.— М.: Мир, 1970.

Зельдович Я. Б. Вселенная.— Квант, 1984, № 3, с. 2.

Зельдович Я. Б. Почему расширяется Вселенная.— Природа, 1985, № 2.

Зельдович Я. Б. Современная космология.— Природа, 1983, № 9.

Кардашев Н. С., Новиков И. Д., Штерн Б. Е.— Природа, 1984, № 5.

Климишин И. А. Релятивистская астрономия.— М.: Наука, 1983.

Комберг Б. В. Загадочные квазары.— М.: Знание, 1981.

Ландау Л. Д., Румер Ю. Б. Что такое теория относительности.— М.: Советская Россия, 1975.

Липсон Г. Великие эксперименты в физике.— М.: Мир, 1972.

Марочник Л. С., Насельский П. Д. Вселенная вчера, сегодня и завтра.— М.: Знание, 1983.

Новиков И. Д., Полнарев А. Г. Первичные черные дыры.— Природа, 1980, № 7.

Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной.— М.: Знание, 1977.

Новиков И. Д. Эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1983.

Орир Дж. Популярная физика.— М.: Мир, 1964.

Силк Дж. Большой Взрыв.— М.: Мир, 1982.

Скобельцын Д. В. Парадокс близнецов в теории относительности.— М.: Наука, 1966.

Тейлор Э. Ф., Уилер Дж. А. Физика пространства-времени.— М.: Мир, 1969.

Уилер Дж. А. Предвидение Эйнштейна.— М.: Мир, 1970.

Филонович С. Р. Самая большая скорость.— М.: Наука, 1983 (Библиотечка «Квант», вып. 27).

Фролов В. П. Введение в физику черных дыр.— М.: Знание, 1983.

Шакура Н. И. Нейтронные звезды и черные дыры в двойных звездных системах.— М.: Знание, 1976.

Шкловский И. С. Звезды. — М.: Наука, 1984.

Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики.— В кн.: *Эйнштейн А.* Полн. собр. соч., т. 4, с. 357.— М.: Наука, 1967.

СОДЕРЖАНИЕ

Владимир Борисович Брагинский
Александр Григорьевич Полнарев
УДИВИТЕЛЬНАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Редактор *Л. П. Русакова*
Технический редактор *Е. В. Морозова*
Корректор *И. Я. Кришталь*

ИБ № 12522

Сдано в набор 13.07.84. Подписано к печати 28.01.85. Т-01246. Формат $84\times108^1/_{32}$. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 8,4. Усл. кр.-отт. 8,82. Уч.-изд. л. 8,63. Тираж 110 000 экз. Заказ № 3552/102 Цена 25 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Набрано в МПО «Первой Образцовой типографии» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054 Москва, Валовая, 28
Отпечатано в Подольском филиале ПО «Периодика», ул. Кирова, д. 25.

10

25 к.